

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai negara yang kaya akan sumber daya alam, salah satunya adalah batugamping atau batu kapur yang melimpah dan tersebar hampir di seluruh wilayah kepulauan. Batugamping banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku utama dalam berbagai sektor industri, khususnya industri semen. Potensi batugamping di Indonesia tergolong sangat besar (Madiadipoera, 1990). Menurut data Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2023 yang mencatat produksi batu kapur mencapai 9.901.294 ton, sehingga pengelolaan kualitas batugamping menjadi aspek penting dalam mendukung keberlanjutan dan efisiensi pemanfaatannya.

Batugamping merupakan salah satu sumber daya mineral yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri, seperti industri semen, pertanian, metalurgi, serta pengendalian emisi gas buang. Kebutuhan terhadap batu gamping terus meningkat seiring berkembangnya aktivitas industri yang menggunakan material ini sebagai bahan baku utama. Dalam proses penggunaannya, batu gamping umumnya ditambang dari lokasi yang berdekatan dengan area industri, kemudian diproses melalui tahapan penghancuran dan penyaringan sebelum masuk ke tahap pengolahan selanjutnya. Ketersediaan yang melimpah dan penggunaannya yang luas menjadikan batu gamping sebagai material penting yang perlu dipahami karakteristiknya, terutama dalam hal kemudahan penggilingannya (Bilen, 2021).

Batugamping tergolong sebagai bahan galian non-logam yang tersusun utama oleh mineral kalsit dan aragonit. Batuan ini didominasi oleh kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) dengan persentase umumnya lebih dari 50% mineral kalsit, sedangkan sisanya terdiri atas mineral lain seperti dolomit. Batugamping termasuk ke dalam kelompok batuan sedimen non-klastik yang terbentuk melalui proses kimiawi atau hasil akumulasi sisa-sisa organisme yang telah mati. Perbedaan komposisi dan proporsi mineral penyusun tersebut menyebabkan variasi sifat fisik batugamping, termasuk tingkat kekerasan dan responnya terhadap energi mekanik, yang pada akhirnya berpengaruh terhadap kemudahan proses penggilingan (Noviyanti et al., 2015).

Salah satu parameter penting untuk menilai kemudahan penggilingan suatu material adalah *Hardgrove Grindability Index* (HGI), yang menggambarkan besarnya energi yang dibutuhkan untuk menggiling material tersebut. Dalam konteks ini, karakteristik kemudahan penggilingan (grindability) batu gamping menjadi aspek yang penting untuk dikaji lebih lanjut (Dolius et al., 2012). HGI merupakan suatu indeks yang menggambarkan tingkat kerapuhan atau kemudahan suatu material untuk digiling. Nilai HGI yang tinggi menunjukkan bahwa material tersebut mudah digiling, sedangkan nilai HGI yang rendah menunjukkan material lebih keras atau sulit digiling. Meskipun HGI umumnya digunakan untuk menilai perilaku penghancuran batubara oleh banyak peneliti, beberapa studi juga telah menerapkannya pada batuan karbonat seperti batugamping, sehingga nilai HGI pada batu gamping dapat dimanfaatkan dalam proses industri, khususnya dalam upaya optimalisasi penggilingan (Rejda et al., 2021).

Nilai HGI pada batugamping tidak hanya mencerminkan kemudahan penggilingan, tetapi juga dipengaruhi oleh komposisi mineral penyusunnya. Untuk mengetahui faktor yang memengaruhi kemudahan penggilingan, diperlukan metode analisis yang mampu

mengidentifikasi kandungan mineral secara akurat. Salah satu metode yang umum digunakan untuk tujuan tersebut adalah *X-Ray Diffraction* (XRD). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi jenis dan karakteristik mineral berdasarkan pola difraksi yang dihasilkan dari struktur kristal dalam batuan. Secara umum, XRD banyak digunakan untuk menentukan kandungan mineral karena mampu menunjukkan komposisi penyusun batuan secara akurat. Informasi kandungan mineral ini penting karena berpengaruh langsung terhadap nilai HGI dan tingkat efisiensi proses penggilingan (Oktamuliani et al, 2015).

PT Semen Tonasa sebagai salah satu produsen semen terbesar di Indonesia memiliki kebutuhan bahan baku batugamping yang konsisten dari segi kualitas dan kemudahan penggilingan. Kurangnya pemahaman yang mendalam mengenai pengaruh komposisi kimia terhadap HGI dapat menyebabkan ketidakefisienan dalam proses produksi, peningkatan konsumsi energi, penurunan umur peralatan, serta potensi gangguan dalam kualitas produk akhir. Dengan melakukan analisis terhadap hubungan kandungan mineral terhadap HGI, diharapkan dapat memberikan informasi penting bagi optimalisasi proses penggilingan serta mendukung upaya efisiensi energi dan keberlanjutan operasional industri semen di Indonesia.

1.2 Tujuan Dan Manfaat

1.2.1 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Menganalisis kandungan mineral batugamping menggunakan metode *X-Ray Diffraction* (XRD).
2. Menghitung nilai *Hardgrove Grindability Index* (HGI) pada sampel batugamping sebagai indikator tingkat kekerasan dan kemudahan proses penggilingan.
3. Menganalisis hubungan antara nilai HGI dengan kandungan mineral penyusunnya guna menentukan mineral yang paling berpengaruh terhadap tingkat kekerasan atau kemudahan tanah liat untuk digiling.

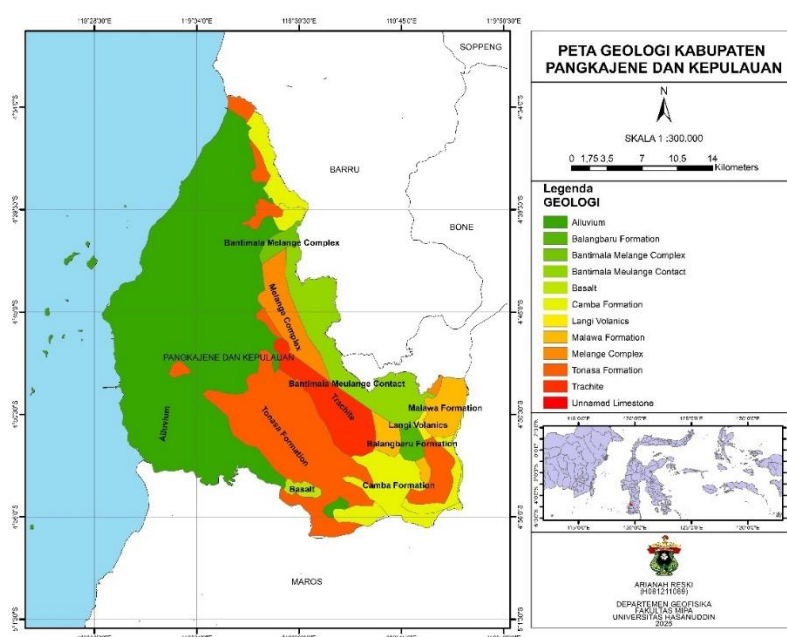
1.2.2 Manfaat

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai komposisi mineralogi batugamping dan pengaruhnya terhadap nilai Hardgrove Grindability Index (HGI) sebagai dasar evaluasi kualitas bahan baku dan pengendalian proses penggilingan guna meningkatkan efisiensi energi dan kinerja produksi semen.
2. Hasil penelitian ini dapat menjadi sumber referensi dan tambahan literatur ilmiah yang mendukung kegiatan penelitian maupun pembelajaran terkait mineralogi, karakterisasi batuan, serta pengaruh komposisi mineral terhadap sifat mekanik batugamping.
3. Untuk menambah pemahaman dan keterampilan peneliti dalam melakukan analisis mineralogi menggunakan XRD, pengujian HGI, serta penerapan analisis statistik dalam menginterpretasi hubungan mineral terhadap *grindability* batugamping.

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Geologi Regional

Secara geologi, Sulawesi memiliki karakteristik yang kompleks karena terletak di zona pertemuan empat lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara, Lempeng Pasifik yang bergerak ke barat, Lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan–tenggara, serta Lempeng Filipina sebagai lempeng mikro. Interaksi dan tumbukan antar lempeng ini menghasilkan konfigurasi geologi yang unik, dengan empat lengan pulau yang terbentuk akibat proses tektonik yang berbeda. Struktur geologi Sulawesi juga dipengaruhi oleh keberadaan sejumlah sesar besar seperti sesar Palu–Koro, Lawanopo, Walanae, Gorontalo, Matano, Batui, Poso, dan Makassar. Aktivitas sesar-sesar tersebut menyebabkan terjadinya percampuran berbagai jenis batuan, menjadikan kondisi stratigrafi Sulawesi sangat kompleks (Sompotan, 2012).



Gambar 1 Peta Geologi Regional Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan

Wilayah penelitian secara regional termasuk dalam cakupan Peta Geologi Lembar Pangkajene dan bagian barat Watampone, Sulawesi Selatan, dengan skala 1:250.000. Secara administratif, area ini berada di antara koordinat 119°5'00"–120°45'00" BT dan 4°–5° LS. Berdasarkan peta geologi regional, bagian barat wilayah penelitian didominasi oleh zona pegunungan yang mencakup hampir setengah luas area. Wilayah pegunungan ini melebar hingga 50 km di bagian selatan dan menyempit menjadi sekitar 22 km di bagian utara, dengan puncak tertinggi mencapai 1.694 meter dan elevasi rata-rata sekitar 1.500 meter di atas permukaan laut.

Satuan stratigrafi yang menyusun kawasan karst Maros–Pangkep didominasi oleh Formasi Tonasa (Temt) yang terdiri atas batugamping koral, batugamping bioklastik, serta kalkarenit. Batuan-batuan ini sebagian telah mengalami proses rekristalisasi, berwarna putih abu-abu hingga kelabu muda, dan ada pula yang kekuningan seperti

gading, dengan struktur berlapis dan bersisik. Secara genetis, batugamping ini merupakan hasil endapan dari lingkungan laut dangkal yang kemudian mengalami pengangkatan dalam proses evolusi geologinya. Sebaran Formasi Tonasa umumnya memanjang dari utara ke selatan, dan menipis ke arah barat laut serta timur laut. Formasi ini juga berasosiasi paralel dengan batupasir dari Formasi Mallawa dan menindih batuan vulkanik dari Formasi Camba (Utoyo, 2008).

1.3.2 Batugamping

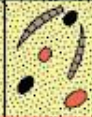
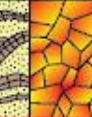
Batugamping (limestone) merupakan salah satu jenis mineral industri yang tergolong dalam kelompok batuan karbonat, yaitu batuan sedimen yang kaya akan kandungan garam karbonat. Batu ini terutama tersusun dari mineral kalsium karbonat (CaCO_3), umumnya dalam bentuk kalsit yang jumlahnya melebihi 50% dari total komposisi batuan, meskipun dalam beberapa kasus dapat mengandung unsur lain seperti magnesium maupun mineral aragonit sebagai bentuk polimorf kalsium karbonat (Alfarizi et al., 2020). Batugamping termasuk dalam batuan sedimen non-klastik yang terbentuk melalui proses kimiawi maupun aktivitas biologis di lingkungan perairan. Komponen utamanya, yaitu CaCO_3 , berasal dari presipitasi larutan karbonat maupun hasil akumulasi sisa organisme laut seperti kerang, siput, koral, hingga plankton. Di Indonesia, batugamping merupakan salah satu sumber daya geologi yang melimpah dan tersebar di berbagai wilayah. Mineral karbonat lain yang kerap ditemukan bersamaan dengan batugamping adalah aragonit, yaitu bentuk stabil dari CaCO_3 yang dapat berubah menjadi kalsit seiring berjalannya waktu. Secara fisik, batugamping berkadar CaCO_3 tinggi umumnya berwarna putih dan ditemukan dalam bentuk batu kapur, kalsit kristalin, hingga marmer. Selain itu, endapan kalsium karbonat juga banyak dijumpai pada formasi geologis seperti stalaktit dan stalagmit di kawasan pegunungan (Lewicka et al., 2020).

Secara genetis, batugamping karbonat terbentuk dari larutan yang kaya garam karbonat melalui presipitasi kimiawi, dengan peran penting organisme laut dalam proses pembentukannya. Batuan karbonat ini dapat terbentuk secara klastik melalui pengendapan mekanis partikel-partikel karbonat, maupun secara kimia melalui konsentrasi larutan garam karbonat yang berasal dari sisa-sisa organisme laut seperti plankton, foraminifera, dan moluska. Akumulasi endapan tersebut kemudian mengalami proses diagenesis yang meliputi sementasi, mikritisasi oleh aktivitas biologis (seperti pelapisan atau pelarutan oleh mikroorganisme), kompaksi (penekanan butiran sedimen akibat beban lapisan di atasnya yang mengurangi porositas), serta neomorfisme (proses penggantian mineral yang sejenis polimorf) (Kazuka et al., 2017).

Batugamping dapat terbentuk melalui tiga mekanisme utama, yaitu organik, mekanik, dan kimiawi. Proses organik melibatkan pengendapan cangkang dan rangka organisme laut; mekanik berasal dari pelapukan material karbonat yang tertransportasi dan mengendap kembali; sedangkan pembentukan kimiawi terjadi akibat reaksi kimia dalam kondisi lingkungan tertentu. Apabila kandungan kalsium oksida (CaO) dalam batugamping melebihi 50% berat, batuan ini sangat potensial digunakan sebagai bahan baku industri, terutama untuk konstruksi dan produksi semen. Selain batugamping, batuan karbonat lainnya yang umum ditemukan adalah dolomit, yang tersusun atas lebih dari 50% mineral dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) dan memiliki karakteristik fisik yang berbeda dari batu kapur murni (Shelley, et al., 2005).

1.3.2.1 Klasifikasi Batugamping

Klasifikasi batugamping yang dikemukakan oleh Dunham (1962) didasarkan pada tekstur batuan saat proses pengendapan. Menurut Dunham, tekstur deposisional merupakan elemen yang relatif stabil dan dapat diamati secara konsisten melalui analisis sayatan tipis. Kriteria utama dalam klasifikasi ini berfokus pada fabrik batuan, terutama dalam membedakan apakah struktur batuan didukung oleh lumpur (*mud-supported*) atau oleh butiran (*grain-supported*), bukan semata-mata berdasarkan komposisi mineralnya. Pengelompokan dalam klasifikasi ini ditentukan oleh perbandingan antara kandungan lumpur dan butiran dalam batugamping. Berdasarkan proporsi tersebut, Dunham membagi batugamping menjadi lima tipe utama, yang penamaannya dapat dikombinasikan dengan jenis butiran serta kandungan mineraloginya. Batugamping yang memiliki kandungan butiran kurang dari 10% dan didominasi oleh matriks lumpur karbonat disebut sebagai *mudstone*. Jika batugamping tersebut mengandung butiran lebih dari 10% namun antar butirannya tidak saling bersinggungan, maka dikategorikan sebagai *wackestone*. Sementara itu, apabila butiran dalam batuan saling bersinggungan satu sama lain, maka disebut *packstone* atau *grainstone*. *Packstone* memiliki tekstur *grain-supported* namun masih mengandung lumpur sebagai matriks. Selain itu, Dunham juga memperkenalkan istilah *boundstone* untuk jenis batugamping yang menunjukkan bahwa komponen penyusunnya saling merekat atau terikat secara alami selama proses pengendapan, yang biasanya menunjukkan keterlibatan proses biogenik atau pengikatan oleh organisme.

Depositional texture recognizable				Depositional texture not recognizable	
Original components not bound together during deposition				Original components were bound together	
Contains mud (clay and fine silt-size carbonate)		Lacks mud and is grain supported			
Mud-supported		Grain-supported			
Less than 10% grains	More than 10% grains				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Crystalline
					

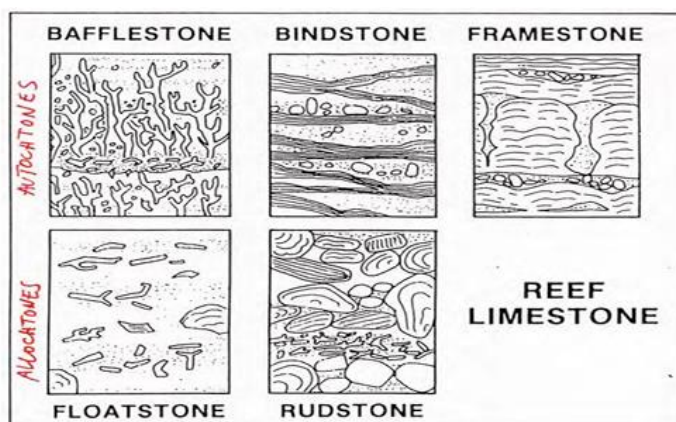
Dunham, 1962

Gambar 2 Klasifikasi Batuan Karbonat (Dunham, 1962)

Dalam klasifikasi batugamping menurut Dunham (1962), istilah yang digunakan secara umum meliputi *grain* dan *mud*. Penamaan tipe batugamping seperti *mudstone*, *packstone*, *grainstone*, dan *wackestone*, ditentukan berdasarkan hubungan antar butiran serta keberadaan lumpur karbonat dalam struktur batuan. Selain itu, terdapat istilah sparit (semen) yang juga digunakan untuk merujuk pada material semen karbonat yang terbentuk melalui proses presipitasi kimia. Menurut Folk (1959), sparit terbentuk bersamaan dengan proses deposisi dan berfungsi sebagai pengisi pori-pori. Sementara itu, menurut Dunham, sparit muncul setelah butiran batuan terendapkan. Jika terjadi jeda waktu antara proses pengendapan butiran dan pembentukan sparit, maka sebagian

butiran dapat mengalami pelarutan dan ruang yang terbentuk kemudian diisi oleh semen karbonat tersebut.

Berdasarkan klasifikasi Dunham, penentuan tingkat energi lingkungan pengendapan didasarkan pada fabrik batuan. Batuan dengan tekstur *mud-supported* diinterpretasikan terbentuk pada lingkungan energi rendah, karena menurut Dunham, lumpur karbonat umumnya hanya dapat terendapkan dalam kondisi perairan yang tenang. Sebaliknya, batuan dengan tekstur *grain-supported* diasosiasikan dengan lingkungan energi tinggi, seperti daerah dengan arus atau gelombang kuat, di mana hanya partikel berukuran butiran yang mampu bertahan dan mengendap (Dunham, 1962).



Gambar 3 Klasifikasi batuan karbonat didasarkan pada tekstur pengendapannya (Embry dan Klovan, 19671)

Klasifikasi batugamping yang dikembangkan oleh Embry dan Klovan (1971) merupakan penyempurnaan dari sistem klasifikasi yang sebelumnya diperkenalkan oleh Dunham (1962). Modifikasi utama yang dilakukan adalah dengan memperluas kategori *boundstone* menjadi tiga sub tipe, yaitu *bafflestone*, di mana organisme berperan sebagai penghalang (baffle) terhadap arus, *bindstone* di mana organisme berfungsi dalam proses penempelan dan pengikatan (encrusting dan binding), serta *framestone* yang terbentuk dari organisme yang menyusun kerangka kaku (rigid framework). Dalam klasifikasi ini, batugamping dibedakan menjadi dua kelompok utama berdasarkan asal-usul komponennya, yaitu batugamping *Allochthonous* yang mengandung lebih dari 10% komponen berukuran butir lebih besar dari 2 mm. Jika butiran tersebut terdispersi dalam matriks dan tidak saling bersinggungan, maka disebut *floatstone*. Namun, jika antar butiran saling menyangga satu sama lain, maka dikategorikan sebagai *rudstone*. Batugamping *Autochthonous* merupakan batuan yang terbentuk dari aktivitas organisme yang saling terikat selama proses pengendapan. Dalam karakteristik organisme penyusunnya, dapat diklasifikasikan menjadi *bafflestone* (terbentuk oleh organisme bertangkai yang memperlambat aliran), *bindstone* (tersusun oleh organisme yang saling menempel dan membentuk struktur tipis serta rata), dan *framestone* (dibentuk oleh organisme yang menghasilkan kerangka fosil yang masif dan menyatu) (Embry dan Klovan, 19671).

1.3.2.2 Proses Pembentukan Batugamping

A. Pembentukan Batugamping pada Lingkungan Laut

Sebagian besar batugamping terbentuk di perairan laut yang dangkal, tenang, dan memiliki suhu hangat. Kondisi ini sangat mendukung kehidupan organisme yang membentuk cangkang dan kerangka dari kalsium karbonat, yang kemudian menjadi bahan utama pembentuk batugamping. Setelah organisme-organisme tersebut mati, sisa cangkang dan kerangkanya mengendap dan membentuk lapisan sedimen yang akhirnya mengalami proses litifikasi menjadi batugamping. Selain itu, sisa-sisa lain dari organisme tersebut juga turut menyumbang dalam pembentukan massa sedimen. Batugamping yang berasal dari akumulasi sisa-sisa organisme ini dikategorikan sebagai batuan sedimen biologis, dan keberadaan fosil sering menjadi penanda asal-usul biologisnya. Di sisi lain, ada juga batugamping yang terbentuk melalui proses pengendapan langsung kalsium karbonat dari air laut. Jenis ini diklasifikasikan sebagai batuan sedimen kimia, meskipun jumlahnya cenderung lebih sedikit dibandingkan dengan batugamping yang terbentuk secara biologis (Apriliani et al., 2012).

B. Pembentukan Batugamping pada Lingkungan Evaporasi

Batugamping juga dapat terbentuk melalui proses penguapan. Contohnya adalah stalaktit, stalagmit, dan berbagai formasi di dalam gua yang dikenal sebagai speleothem. Di dalam gua, air yang merembes melalui celah atau pori-pori di langit-langit akan menetes ke dalam ruang gua. Sebelum tetesan air ini mencapai lantai, sebagian air menguap, menyisakan endapan kalsium karbonat di langit-langit gua. Lama-kelamaan, endapan ini menumpuk dan membentuk struktur menyerupai es yang menggantung, yang disebut stalaktit. Jika tetesan air jatuh ke lantai gua dan menguap di sana, kalsium karbonat akan mengendap dan tumbuh ke arah atas, membentuk struktur yang disebut stalagmit (Apriliani et al., 2012).

1.3.3 Kelompok Mineral dalam Batugamping

Batugamping merupakan batuan sedimen yang didominasi mineral karbonat, terutama kalsit (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), dan aragonit. Selain itu, batu gamping juga dapat mengandung mineral silikat seperti kuarsa (SiO_2), feldspar (Ca- dan K-feldspar), muskovit, dan kaolinit. Dalam jumlah kecil, mineral oksida seperti hematit (Fe_2O_3) juga ditemukan. Setiap mineral memberikan sifat fisik dan kimia yang berbeda pada batuan. Berikut adalah uraian dari masing-masing kelompok mineral (Marin & Winarno, 2020).

1. Mineral Karbonat

a) Kalsit (CaCO_3)

Kandungan mineral pada batugamping yang dominan adalah kalsit (CaCO_3). Kalsit merupakan mineral karbonat dan polimorf kalsium karbonat yang paling stabil. Karena karakteristik fisik dan kimianya, kalsit menjadi salah satu mineral yang paling umum dijumpai. Mineral ini sangat umum ditemukan di seluruh dunia baik di dalam batuan sedimen, batuan metamorf, maupun batuan beku. Secara fisik, kalsit memiliki berbagai ciri dengan berwarna bening atau putih, abu-abu, kekuningan, hingga kehijauan. Kalsit juga memiliki kilap seperti kaca, cerat berwarna putih, tingkat transparansi mulai dari tembus cahaya hingga transparan. Kalsit memiliki kekerasan yang relatif rendah, yaitu 3 pada skala Mohs, serta struktur kristal rombohedral

dengan belahan sempurna di tiga arah. Sifat-sifat ini menjadikan kalsit mudah dihancurkan dan digiling.



Gambar 4 Kalsit (Marin & Winarno, 2020)

b) Aragonit

Aragonit merupakan salah satu mineral karbonat yang termasuk dalam dua bentuk kristal utama kalsium karbonat (CaCO_3), selain kalsit. Mineral ini terbentuk melalui proses biologis maupun fisik, seperti pengendapan di lingkungan laut dan perairan tawar. Struktur kristalnya berbeda dengan kalsit karena memiliki sistem kristal ortorombik dengan bentuk menjarum. Secara fisik, aragonit memiliki beragam warna, seperti putih, merah, kuning, jingga, hijau, ungu, abu-abu, biru, hingga cokelat. Bentuk kristalnya dapat berupa prismatic, menjarum, membulat, hingga koraloidal, serta menunjukkan kilap kaca atau kilap damar pada bidang retaknya. Mineral ini memiliki cerat putih, transparansi mulai dari translusen hingga transparan, pecahan konkoidal, dan tingkat kekerasan 3,5–4 pada skala Mohs. Aragonit secara alami ditemukan pada hampir semua cangkang moluska serta rangka berkapur karang air hangat dan dingin. Secara kestabilan, aragonit merupakan mineral karbonat yang paling tidak stabil dan bersifat metastabil pada tekanan rendah di dekat permukaan bumi, sehingga umumnya berubah menjadi kalsit dan selanjutnya kalsit dapat mengalami transformasi menjadi dolomit.



Gambar 5 Aragonit (Marin & Winarno, 2020)

c) Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)

Dolomit adalah mineral karbonat anhidrat yang tersusun atas kalsium magnesium karbonat dengan rumus kimia $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Istilah dolomit juga digunakan untuk menyebut batuan sedimen karbonat yang sebagian besar terdiri dari mineral ini. Dibandingkan aragonit dan kalsit, dolomit merupakan mineral karbonat yang paling stabil. Pembentukan dolomit dapat terjadi melalui dua mekanisme utama. Pertama, secara primer melalui proses sedimentasi langsung dari air laut, meskipun bukti ilmiahnya masih terbatas. Umumnya dolomit yang terbentuk secara primer berasosiasi dengan urat dan cebakan bijih. Kedua, secara sekunder, yaitu akibat penggantian mineral kalsit melalui proses dolomitasi, yaitu peresapan ion magnesium dari air laut ke dalam batugamping. Proses ini dapat berlangsung lama dan dipengaruhi oleh tekanan air yang kaya magnesium, serta umumnya terjadi pada batugamping berumur tua. Selain itu, dolomit sekunder juga dapat terbentuk melalui presipitasi pada lingkungan evaporit. Dengan demikian, dolomit yang umum ditemukan biasanya terbentuk melalui proses diagenesis dari kalsit maupun aragonit. Mineral dolomit mengkristal dalam sistem trigonal-rhombohedral dengan warna putih, cokelat, abu-abu, atau merah muda. Struktur kristalnya tersusun dari kalsium dan magnesium yang berselang-seling, sehingga membentuk kristal berbentuk tabung atau kolom dengan permukaan melengkung, terkadang mirip stalaktit, dan juga dapat berbentuk granular atau masif. Dolomit memiliki belahan tiga arah rhombohedral, pecahan konkoidal, kilap kaca, cerat putih, serta kekerasan antara 3,5–4 pada skala Mohs. Struktur kristal rhombohedranya yang kompak dan simetris, dengan susunan atom Ca dan Mg yang berselang-seling secara teratur, membentuk ikatan kimia yang lebih kuat dan stabil. Struktur ini menghasilkan bidang belahan yang kurang sempurna dibandingkan kalsit, sehingga membutuhkan energi lebih besar untuk memecahnya (Marin & Winarno, 2020)



Gambar 6 Dolomit (Marin & Winarno, 2020)

2 Mineral Silikat

a) Kuarsa (SiO_2)

Kuarsa adalah mineral tektosilikat yang tersusun murni dari SiO_2 tanpa tambahan unit struktural lain sebagaimana mineral silikat pada umumnya. Struktur kuarsa dibentuk oleh jaringan kerangka silika tetrahedra yang saling terhubung, menciptakan ikatan kuat dan stabil dengan rasio Si:O = 1:2. Pola ini menyebabkan

kuarsa tidak memiliki belahan yang jelas dan memiliki kekerasan tinggi (skala Mohs 7), menjadikannya mineral yang keras, stabil, dan resisten. Kuarsa termasuk mineral pembentuk batuan yang sangat melimpah dan tergolong dalam sistem kristal heksagonal-rombohedral. Struktur kristal heksagonal-rombohedral kuarsa yang tersusun atas jaringan tiga dimensi silika tetrahedra (SiO_4) yang saling terhubung melalui ikatan kovalen Si-O yang kuat, menciptakan struktur yang sangat stabil dan kompak. Struktur jaringan kovalen ini menyebabkan kuarsa tidak memiliki bidang belahan yang sempurna, sehingga cenderung pecah secara tidak teratur (konkoidal) dan membutuhkan energi sangat besar untuk memecahnya. modulus elastisitas kuarsa yang tinggi menunjukkan mineral ini sangat kaku dan kurang mampu menyerap energi benturan secara efisien. Mineral ini dapat terbentuk sebagai komponen primer maupun sekunder dalam batuan beku, sedimen, maupun metamorf. Stabilitas kimia dan kekerasannya membuat kuarsa tahan terhadap pelapukan serta mampu bertahan sebagai butiran lepas yang tertransportasi dalam jarak jauh (Hurlbut dan Switzer, 1979).



Gambar 7 Kuarsa (Hurlbut dan Switzer, 1979).

b) Feldspar

Feldspar merupakan kelompok mineral tektosilikat yang sangat melimpah di kerak bumi dan memiliki struktur serupa dengan kuarsa, namun disertai kehadiran kation tambahan seperti Na, K, Ca, dan Al. Feldspar dibagi menjadi tiga *endmember* utama, yaitu:

- Anortit (Ca-feldspar): $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$
- Albit (Na-feldspar): $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
- Ortoklas (K-feldspar): KAlSi_3O_8

Selain ketiga *endmember* ini, feldspar sering memiliki variasi komposisi dengan campuran kation dalam berbagai proporsi. Plagioklas (Na) dan K-feldspar sering disebut alkali feldspar karena kandungan Na dan K yang dominan. Berbeda dengan kuarsa yang memiliki struktur kovalen padat tanpa bidang belahan, K-feldspar memiliki dua bidang belahan yang sempurna dan berpotongan hampir tegak lurus, menciptakan bidang kelemahan alami yang memudahkan propagasi retak. Selain itu, ukuran kation Kalium (K^+) yang besar menyebabkan struktur kristalnya lebih longgar. Dalam matriks batugamping, K-feldspar juga dapat mengalami alterasi menjadi mineral lempung yang lebih lunak dan menciptakan zona lemah pada batas butir.



Gambar 8 Feldspar (Hurlbut dan Switzer, 1979).

3 Mineral Oksida

Mineral oksida merupakan kelompok mineral yang tersusun dari anion oksigen (O^{2-}) yang berikatan dengan satu atau lebih kation logam. Salah satu mineral penting dalam kelompok ini adalah hematit (Fe_2O_3), yang dikenal sebagai bijih utama besi. Hematit umumnya memiliki warna merah kecokelatan dengan kilap logam hingga sublogam dan tingkat kekerasan sedang, sekitar 5,5–6,5 pada skala Mohs. Mineral ini terbentuk melalui berbagai proses, seperti kristalisasi magma, pengendapan hidrotermal, serta oksidasi mineral besi selama pelapukan. Hematit relatif stabil dan tahan terhadap pelapukan kimia, sehingga sering ditemukan sebagai lapisan oksida pada batuan.



Gambar 9 Hematit (Marin & Winarno, 2020)

1.3.4 Semen

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis, yaitu material anorganik yang digiling halus dan ketika dicampur dengan air, akan mengalami reaksi hidrasi yang menghasilkan pasta. Pasta ini kemudian mengeras dan mampu mempertahankan kekuatan serta kestabilannya bahkan saat berada dalam lingkungan yang basah atau terendam air. Semen Portland menjadi jenis semen yang paling umum digunakan dalam konstruksi beton. Berdasarkan definisi dari SNI 15-2049-2004, semen Portland merupakan semen

hidrolik yang diperoleh dari hasil penggilingan yang mayoritas mengandung kalsium silikat bersifat hidrolis bersama dengan satu atau lebih bentuk senyawa kalsium sulfat sebagai bahan tambahan, serta dapat pula ditambahkan bahan lain dalam jumlah tertentu. Semen Portland terdiri dari serbuk halus mineral kristalin yang komponen utamanya meliputi kalsium silikat dan aluminium silikat. Ketika mineral ini dicampur dengan air, akan terbentuk pasta yang setelah mengering memiliki kekuatan menyerupai batu. Semen jenis ini memiliki berat jenis antara 3,12 hingga 3,16, dan berat volumenya sekitar 94 lb/ft³. Adapun bahan baku utama dalam pembuatan semen antara lain:

1. Kapur (CaO) yang diperoleh dari batu kapur,
2. Silika (SiO₂) yang berasal dari lempung,
3. Alumina (Al₂O₃) juga dari lempung.

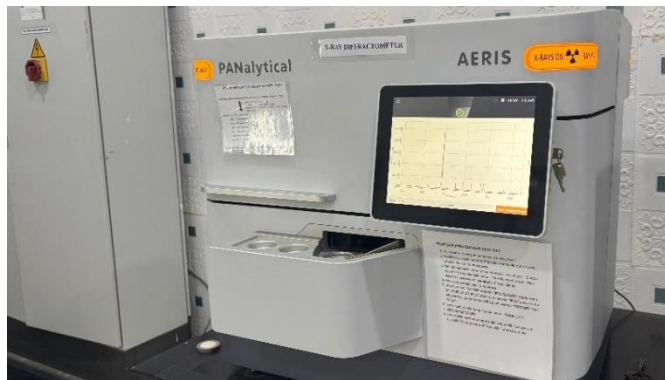
Komposisi ini umumnya mengandung sedikit magnesita (MgO) serta kadang ditambahkan unsur alkali. Oksida besi juga sering ditambahkan sebagai pengontrol komposisi (Edward G. Nawy, 1995).

1.3.5 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis mineral berdasarkan pola difraksi yang ditimbulkan oleh struktur kristalnya. Prinsip kerja metode ini didasarkan pada hamburan sinar-X oleh susunan atom dalam kisi kristal pada sudut tertentu, yang dikenal sebagai sudut Bragg. Analisis XRD secara umum digunakan dalam penentuan kandungan mineral, karena mampu mendeteksi dan mengidentifikasi komponen mineral penyusun batuan (Oktamuliani et al, 2015).

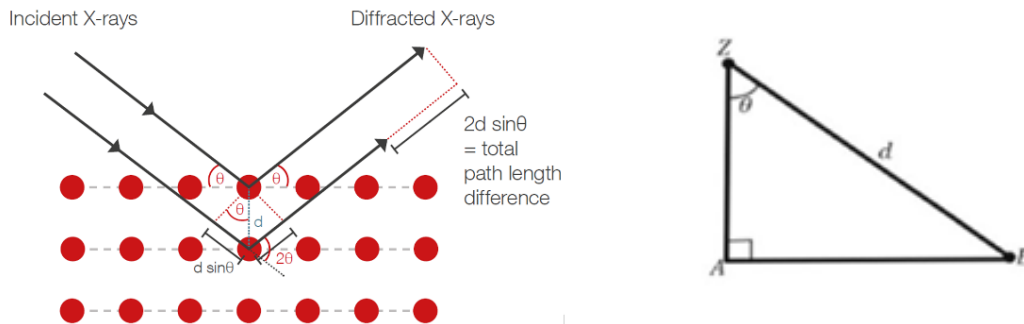
Metode difraksi sinar-X (XRD) bekerja berdasarkan prinsip interferensi konstruktif dari sinar-X monokromatik yang mengenai permukaan sampel kristalin. Ketika sinar-X diarahkan ke bahan yang memiliki susunan atom teratur, seperti zat kristal, sinar tersebut akan terdifraksi dan membentuk pola interferensi tertentu. Pola ini kemudian dianalisis untuk memperoleh informasi mengenai struktur atomik atau molekuler dari bahan tersebut, termasuk identifikasi fasa mineral. XRD dikenal sebagai teknik analisis yang cepat dan andal dalam mengidentifikasi serta mengkarakterisasi material, sehingga secara luas digunakan di bidang geosains, fisika, maupun dalam industri. Salah satu keunggulan metode ini adalah kebutuhan persiapan sampel yang minimal serta hasil data yang dapat diinterpretasikan secara langsung. Dalam bidang geologi, XRD umumnya dimanfaatkan untuk mengidentifikasi jenis-jenis mineral yang terkandung dalam suatu sampel, serta menentukan proporsi relatif dari masing-masing mineral dalam campurannya. Selain itu, XRD juga memiliki aplikasi penting lainnya dalam karakteristik struktur kristal suatu mineral secara lebih mendalam (Alderton, 2021).

Untuk mengetahui komposisi mineral dalam batugamping secara akurat, salah satu metode yang umum digunakan adalah difraksi sinar-X (X-Ray Diffraction). XRD merupakan teknik analitik non-destruktif yang sangat berguna dalam identifikasi maupun analisis kuantitatif berbagai bentuk kristal yang terdapat dalam sampel, baik dalam bentuk serbuk maupun padat. Difraksi terjadi ketika gelombang sinar-X mengalami pembelokan saat melewati kisi kristal dari suatu zat, sehingga gelombang yang tersebar menghasilkan pola interferensi baik penguatan maupun pelemahan sinyal tergantung pada posisi relatif atom dalam struktur kristalnya (Pratapa, 2009).



Gambar 10 Alat X-Ray Diffraction

Gambar 10 merupakan alat *X-Ray Diffraction* yang digunakan di PT. Semen Tonasa. Ketika sinar-X diarahkan ke suatu material padat, gelombang ini akan dihamburkan oleh elektron-elektron yang mengelilingi inti atom. Gelombang-gelombang hasil hamburan tersebut menyebar ke berbagai arah dan dapat mengalami interferensi konstruktif maupun destruktif, tergantung pada arah dan sifat gelombangnya. Berdasarkan teori Bragg, struktur kristal dapat dianggap sebagai susunan bidang atom yang berlapis-lapis, dengan jarak antar bidang sebesar d . Ketika sinar-X mengenai bidang-bidang ini, sebagian akan dipantulkan membentuk sudut yang tetap antara berkas datang dan berkas difraksi. Difraksi terjadi sebagai hasil interferensi konstruktif dari gelombang yang tersebar, yang memenuhi syarat apabila selisih lintasan gelombang sama dengan kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang $n\lambda$. Kondisi ini dikenal sebagai hukum Bragg. Persamaan difraksi sinar-X ini dapat diturunkan menggunakan prinsip geometri dasar, salah satunya melalui teorema Pythagoras yang menggambarkan hubungan antara sudut, jarak antar bidang, dan panjang gelombang (Ali et al, 2022).



Gambar 11 Difraksi Sinar-X (Ali et al, 2022)

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2)$$

Dengan:

n = orde (1,2...n)

d = jarak antar bidang atom

λ = panjang gelombang (m)

θ = sudut sinar difraksi (sinar datang dan sinar pantul)

Prinsip kerja dasar *X-Ray Diffraction* (XRD) adalah memanfaatkan fenomena difraksi cahaya yang terjadi saat gelombang sinar-X melewati kisi kristal. Difraksi ini hanya terjadi apabila panjang gelombang radiasi yang digunakan sebanding dengan jarak antar atom dalam struktur kristal, yaitu sekitar 1 d. Jenis radiasi yang dapat digunakan meliputi sinar-X, elektron, dan neutron. Sinar-X sendiri merupakan foton berenergi tinggi dengan panjang gelombang antara 0,5 hingga 2,5 d. Ketika sinar-X diarahkan ke suatu material, sebagian energi akan diserap dan sebagian lainnya dihamburkan oleh atom-atom penyusun material, sehingga intensitas sinar yang diteruskan menjadi lebih rendah dibandingkan sinar datang. Sinar-X monokromatik yang mengenai kisi kristal akan dihamburkan ke berbagai arah. Namun, karena keteraturan posisi atom-atom dalam kristal, maka pada arah tertentu akan terjadi interferensi konstruktif (penguatan gelombang), sedangkan pada arah lainnya terjadi interferensi destruktif (pelemahan gelombang). Gelombang sinar-X yang mengalami interferensi konstruktif inilah yang disebut sebagai berkas difraksi (Hakim et al., 2019).

1.3.6 Hardgrove Grindability Index (HGI)

Grindability adalah suatu parameter yang menggambarkan sejauh mana suatu material dapat digiling atau dihancurkan dengan mudah. Hardgrove Grindability Index (HGI) merupakan salah satu karakteristik fisik dari batubara yang menunjukkan tingkat kemudahan material tersebut untuk dihaluskan. HGI merupakan suatu bilangan yang menunjukkan mudah atau tidaknya suatu material digiling. Untuk memahami kekerasan suatu material, salah satu indeks yang paling umum digunakan adalah Hardgrove Grindability Index (HGI). Indeks ini mengukur tingkat kemudahan suatu material untuk digiling, sehingga sangat berguna dalam perancangan dan optimalisasi proses penggilingan di industri. Meskipun HGI secara luas digunakan untuk menilai perilaku penghancuran batubara, beberapa penelitian juga telah mengaplikasikan HGI dalam konteks material karbonat, khususnya batu gamping (limestone). Nilai yang lebih rendah menunjukkan bahwa bahan tersebut lebih sulit digiling dan membutuhkan energi yang lebih besar, sedangkan nilai yang lebih tinggi menunjukkan bahan yang lebih mudah digiling.

HGI tidak hanya memberikan informasi tentang sifat mekanik material, tetapi juga membantu dalam perencanaan proses industri yang lebih efisien dan hemat energi. Secara umum, HGI merupakan metode yang sederhana, cepat, dan relatif murah untuk mengevaluasi grindability material padat. Hasil pengujian ini dapat digunakan untuk perancangan proses penggilingan, pemilihan peralatan, estimasi energi, hingga optimasi proses industri. Penerapan HGI pada batu gamping menjadi relevan karena batu gamping merupakan bahan baku utama dalam semen, dan efisiensi proses penggilingannya sangat bergantung pada sifat fisik dan mineralogi batu tersebut (Hower et al., 1992).

Dalam penelitian ini, daya giling batugamping dianalisis menggunakan pendekatan yang sejalan dengan konsep Hardgrove Grindability Index (HGI), yaitu dengan mengamati jumlah residu yang tertahan pada ukuran ayakan tertentu, khususnya 45 mikron, setelah sampel mengalami proses penggilingan standar. Semakin kecil persentase residu yang tertahan pada ayakan tersebut menunjukkan bahwa material

lebih mudah digiling dan menghasilkan fraksi partikel halus yang lebih banyak, sehingga secara tidak langsung berkorelasi dengan nilai HGI yang lebih tinggi. Sebaliknya, jumlah residu yang lebih besar menunjukkan bahwa material memiliki tingkat kesulitan penggilingan yang lebih tinggi. Nilai HGI yang diperoleh dari setiap sampel kemudian digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk menggambarkan karakteristik penggilingan batugamping, sehingga dapat memberikan gambaran mengenai kebutuhan energi selama proses penggilingan serta potensi keausan peralatan. Informasi ini menjadi penting dalam upaya optimasi proses dan pengendalian kualitas pada industri semen (Eren and Gungor, 2016).

Uji grindability dilakukan menggunakan alat *Air Jet Sieve*. Seluruh sampel diuji untuk menentukan nilai HGI. Pengujian menggunakan standar PT. Semen Tonasa dengan prosedur sebagai berikut:

1. Siapkan sampel batugamping sebanyak 500 gr
2. Sampel di *Crusher* hingga berukuran sebiji jagung
3. Split sampel batugamping yang telah dihancurkan
4. Masukkan sampel ke dalam disk mill untuk penggilingan lebih lanjut
5. Sampel limestone sebanyak 70 gr digiling ke dalam Swing Mill sebanyak 10 detik
6. Sampel batugamping dari Swing Mill diuji lanjut dengan residu 45 μm
7. Jumlah material hasil gilingan yang lolos ayakan kemudian dimasukkan ke dalam rumus sebagai berikut:

$$HGI = 100\% - \left(\frac{\text{Residu Tertahan}}{\text{Bobot Sampel}} \times 100\% \right) \quad (1)$$

Dengan:

HGI = Hardgrove Grindability Index

Residu Tertahan = Berat material yang tidak lolos saringan

Bobot Sampel = 10 gram

Tabel 2 Penggolongan Nilai Grindability Material Batugamping

NILAI HGI	GOLONGAN
>40%	Tinggi
30-40%	Standar Perusahaan
<30%	Rendah

Melalui pendekatan regresi linear, dilakukan pemodelan statistik untuk mengetahui mineral penyusun yang paling berpengaruh terhadap nilai Hardgrove Grindability Index (HGI) suatu material. Metode ini digunakan untuk menganalisis hubungan antara komposisi mineral batugamping yang diperoleh dari hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD) sebagai variabel independen dengan nilai HGI sebagai variabel dependen yang merepresentasikan respon mekanik atau tingkat kekerasan material. Pendekatan regresi ini memungkinkan identifikasi arah dan besarnya pengaruh masing-masing mineral terhadap kemudahan penggilingan batugamping. Pemilihan model regresi terbaik tidak hanya didasarkan pada signifikansi hubungan antar variabel, tetapi juga pada kemampuan model dalam menjelaskan variasi nilai HGI berdasarkan komposisi mineral penyusunnya. Oleh karena itu, digunakan metode Best Subsets Regression, yaitu teknik

seleksi model yang mengevaluasi berbagai kombinasi variabel independen dan memilih model yang paling representatif berdasarkan beberapa parameter statistik, seperti R-Squared (R^2), Adjusted R-Squared (R^2 adj), Predicted R-Squared (R^2 pred), Mallows' Cp, serta Standard Error of Regression (S). Parameter-parameter tersebut digunakan secara bersama-sama untuk menilai tingkat ketepatan, efisiensi, dan kemampuan prediksi model regresi. Dengan demikian, regresi linear dalam penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis statistik, tetapi juga sebagai pendekatan prediktif untuk memahami pengaruh komposisi mineral terhadap sifat fisik batugamping dalam mendukung efisiensi proses penggilingan di industri semen. (Schumacker, 1994).

1. *R-Squared* (R^2) merupakan ukuran yang digunakan untuk mengetahui seberapa besar variasi dari variabel dependen yang dapat dijelaskan oleh variabel independen dalam suatu model regresi. Nilai R^2 berada pada rentang 0–1, di mana semakin mendekati angka 1 berarti model memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menjelaskan hubungan antar variabel. Sebaliknya, nilai yang rendah menunjukkan bahwa variabel independen kurang mampu menjelaskan variasi dari variabel dependen.
2. *Adjusted R-Squared* (R^2 adj) adalah pengembangan dari R^2 yang mempertimbangkan jumlah variabel independen dalam model. Tidak seperti R^2 yang selalu meningkat ketika ditambahkan variabel baru, R^2 adj dapat menurun jika variabel yang ditambahkan tidak relevan atau tidak signifikan. Dengan demikian, R^2 adj memberikan penilaian yang lebih objektif terhadap kecocokan model, terutama ketika melibatkan banyak variabel prediktor.
3. *Predicted R-Squared* (R^2 pred) digunakan untuk mengukur kemampuan model dalam memprediksi data baru yang tidak termasuk dalam sampel penelitian. Nilai ini sangat penting untuk menilai sejauh mana model dapat digeneralisasikan ke kondisi nyata di luar data yang digunakan dalam pembentukan model. Jika nilai R^2 tinggi namun R^2 pred rendah, maka hal ini mengindikasikan adanya masalah overfitting, di mana model terlalu sesuai dengan data sampel tetapi kurang mampu memprediksi data baru.
4. *Mallows' Cp* merupakan kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi apakah suatu model regresi terlalu sederhana (underfitting) atau terlalu kompleks (overfitting). Model yang baik ditunjukkan oleh nilai Cp yang mendekati $p+1$, dengan p adalah jumlah variabel independen yang digunakan. Jika nilai Cp terlalu besar, hal ini menandakan adanya kelebihan variabel dalam model, sedangkan nilai Cp yang terlalu kecil namun tidak seimbang dengan R^2 dapat menandakan model kurang representatif.
5. *Standar Error of Regression* (S) adalah ukuran rata-rata kesalahan antara nilai yang diprediksi oleh model dengan nilai aktual pada data. Semakin kecil nilai S, maka semakin tinggi tingkat ketepatan prediksi model tersebut. Nilai S memberikan gambaran seberapa dekat hasil perhitungan model dengan kondisi sebenarnya, sehingga menjadi indikator penting dalam menilai akurasi model regresi.
6. Interpretasi Koefisien Regresi, setelah model regresi dievaluasi secara keseluruhan, langkah selanjutnya adalah melakukan interpretasi terhadap masing-masing koefisien regresi. Setiap koefisien menggambarkan arah

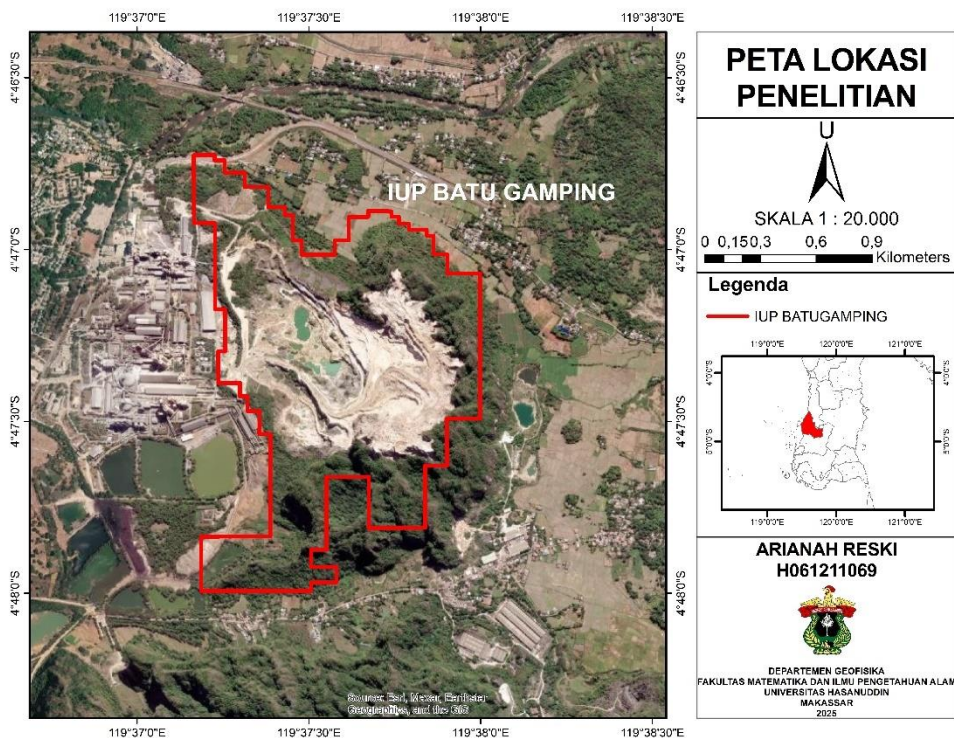
hubungan, baik positif maupun negatif, serta besarnya pengaruh variabel independen terhadap variabel dependen dengan asumsi bahwa variabel independen lainnya berada dalam kondisi konstan. Interpretasi ini penting untuk memahami kontribusi masing-masing variabel dalam menjelaskan perubahan variabel terikat.

7. Pemilihan Model Terbaik (Best Subsets Regression), metode Best Subsets Regression atau All Subsets Regression merupakan pendekatan sistematis yang digunakan untuk mengevaluasi seluruh kombinasi variabel independen yang mungkin dalam suatu model regresi. Tujuan dari metode ini adalah untuk menentukan model terbaik berdasarkan kriteria statistik tertentu, seperti nilai Adjusted R-Square, Predicted R-Square, Mallows' Cp, serta Bayesian Information Criterion (BIC) atau Akaike Information Criterion (AIC). Melalui kriteria tersebut, model yang dipilih diharapkan memiliki keseimbangan terbaik antara tingkat akurasi, kemampuan prediksi, dan kompleksitas model.

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 5 Mei – 17 Juni 2025 dan lokasi penelitian ini berada di *Quarry* penambangan batugamping PT. Semen Tonasa, dan laboratorium *Quality Control* Tonasa IV dan V. Penelitian ini dimulai dengan proses pengambilan sampel di penambangan *Quarry* batugamping PT Semen Tonasa.



Gambar 12 Peta Lokasi Pengambilan Sampel

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Spidol permanen, digunakan untuk menandai dan memberi kode pada setiap sampel batugamping.
2. Plastik sampel, berfungsi sebagai wadah untuk menyimpan batuan hasil pengambilan di lapangan.
3. HT (*Handy Talkie*), digunakan untuk memfasilitasi komunikasi antar anggota tim selama proses pengambilan sampel berlangsung.
4. Palu geologi, berguna untuk memecahkan batugamping yang berukuran besar agar lebih mudah diambil dan diubah menjadi fragmen yang lebih kecil sebelum masuk ke alat preparasi.

5. Kertas penanda sampel, digunakan untuk menuliskan kode identitas masing-masing sampel batugamping.
6. GPS (*Global Positioning System*), dimanfaatkan untuk menentukan titik koordinat lokasi pengambilan sampel secara akurat.
7. *Disk mill* 4B digunakan untuk melakukan penghalusan lanjutan pada batugamping hingga menjadi serbuk halus.
8. *Ring* cetak berperan sebagai media untuk mencetak serbuk batugamping menjadi bentuk padat.
9. *Swing mill* Herzog dipakai untuk menggiling batugamping dalam waktu sekitar dua menit.
10. Neraca digital berfungsi untuk menimbang batugamping dengan akurasi tinggi hingga mencapai 10 gram.
11. Alat *Jaw crusher* digunakan untuk mengecilkan ukuran awal batugamping sebelum proses penghalusan lanjutan.
12. *Automatic press* merupakan alat pengepres yang mencetak sampel ke dalam ring cetak agar siap dianalisis.
13. Komputer lengkap dengan software OXSAS dan Search Match digunakan untuk mengontrol alat XRD serta memproses data hasil analisis unsur.
14. Pensil digunakan untuk memberikan penanda atau identitas pada sampel yang telah selesai dicetak.
15. *Vessel* adalah wadah khusus tempat batugamping yang akan digiling dalam *swing mill*.
16. Oven digunakan untuk mengeringkan batugamping sebelum proses penggilingan agar hasilnya lebih optimal.
17. Alat XRD (X-Ray Diffraction) dan komponennya digunakan untuk menganalisis kandungan unsur kimia yang terdapat dalam batugamping.
18. Ayakan 45 *micron* berfungsi menyaring hasil penggilingan untuk mengetahui nilai residu.
19. Air jet sieve digunakan sebagai alat penyaring partikel halus setelah proses penggilingan.

2.2.2 Bahan

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan berupa sampel batu gamping yang diambil langsung dari *quarry* PT. Semen Tonasa yang berlokasi di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan. Selain itu, digunakan juga *grinding aid* sebagai bahan campuran batugamping agar batugamping dapat mengeras dan tidak lengket di wadah vessel.

2.3 Pengumpulan Data

2.3.1 Metode Pengumpulan Data

Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Metode Observasi dilakukan dengan cara peninjauan langsung ke lokasi penambangan batugamping PT. Semen Tonasa, untuk mengamati kondisi geologi, proses penambangan, serta menentukan titik lokasi pengambilan sampel. Observasi juga dilakukan di laboratorium untuk melihat proses preparasi dan pengujian sampel.

2. Metode Eksperimen dilakukan melalui pengujian laboratorium *Quality Control* terhadap sampel batu gamping yang telah diambil. Analisis yang dilakukan meliputi analisis X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi jenis dan kandungan mineral dalam sampel batu gamping dan pengujian Hardgrove Grindability Index (HGI) untuk mengukur tingkat kemudahan penggilingan batu gamping sebagai parameter dalam menilai efisiensi proses penggilingan.

2.3.2 Prosedur Pengambilan Sampel

1. Melakukan observasi awal terhadap lokasi quarry batugamping PT. Semen Tonasa.
2. Mengambil sampel batugamping pada titik lokasi yang telah ditentukan
3. Mencatat dan memberikan kode sampel batugamping yang telah diambil dari lokasi pengambilan sampel
4. Menyimpan sampel batugamping beserta label kodenya ke dalam kantong plastik sampel
5. Membawa sampel yang telah dikemas ke kendaraan untuk selanjutnya dikirim ke laboratorium

2.3.3 Prosedur Uji X-Ray Diffraction Batugamping

1. Memperkecil ukuran awal batugamping menggunakan palu geologi agar dapat masuk ke dalam alat *Jaw Crusher*.
2. Menghancurkan material batugamping menggunakan *Jaw Crusher* untuk menghasilkan ukuran yang lebih kecil.
3. Mengeringkan material hasil penghancuran dengan oven sebelum tahap penghalusan untuk menghilangkan kadar H_2O .
4. Menghaluskan batu gamping kering menggunakan *Disk Mill* hingga menjadi serbuk halus.
5. Menimbang sebanyak 10 gram sampel yang sudah halus menggunakan neraca analitik, kemudian menambahkan 3 butir *grinding aid* sebagai bahan perekat.
6. Memasukkan campuran sampel dan *grinding aid* ke dalam *grinding vessel* untuk tahap penggilingan lanjutan.
7. Memasukkan *grinding vessel* ke dalam *swing mill* dan menggiling selama 10 detik hingga campuran menjadi homogen.
8. Mengeluarkan *grinding vessel* dari alat, lalu menuangkan hasil penggilingan ke atas kertas bersih.
9. Memasukkan sampel ke dalam *ring* cetakan dan press menggunakan mesin press atau *automatic press*.
10. Memasukkan sampel yang telah dicetak dalam *ring* ke alat X-Ray Diffraction (XRD) dengan bantuan perangkat lunak X'Pert HighScore (PANalytical) untuk mengetahui kandungan mineral dalam sampel batugamping.

2.3.4 Prosedur Uji Hardgrove Grindability Index (HGI)

1. Menyiapkan sampel batu gamping sebanyak 500 gram untuk dilakukan proses pengujian.
2. Menghancurkan sampel menggunakan alat *crusher* hingga mencapai ukuran seukuran biji jagung.
3. Split sampel hasil penghancuran untuk memperoleh sampel yang homogen.
4. Memasukkan sampel yang telah dihancurkan ke dalam alat *disk mill* untuk proses penggilingan lanjutan hingga mencapai ukuran lebih halus.
5. Menimbang sampel sebanyak 70 gram dari hasil *disk mill* untuk kemudian digunakan dalam penggilingan berikutnya.
6. Menggiling sampel menggunakan alat *swing mill* selama 10 detik untuk memperoleh butiran yang lebih seragam.
7. Memasukkan sampel hasil swing mill ke dalam *Air Jet Sieve* dengan ukuran ayakan 45 mikron.
8. Melakukan pengukuran untuk mendapatkan residu (%) di atas ayakan 45 mikron.
9. Menimbang residu yang tidak lolos ayakan
10. Mencatat hasil pengujian untuk kemudian digunakan dalam menghitung nilai Hardgrove Grindability Index (HGI).

2.3.5 Prosedur Pengolahan Data

1. Menggabungkan data hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD) dengan nilai Hardgrove Grindability Index (HGI) dalam satu tabel kerja, di mana setiap baris mewakili satu sampel dan setiap kolom berisi nilai kandungan mineral serta HGI.
2. Menetapkan HGI sebagai variabel dependen (Y), sedangkan seluruh kandungan mineral hasil analisis XRD sebagai variabel independen (X).
3. Melakukan analisis Best Subsets Regression menggunakan perangkat lunak Minitab dan Excel untuk melakukan analisis best subsets regression dengan tujuan menemukan kombinasi variabel mineral yang paling berpengaruh terhadap HGI.
4. Menentukan model regresi terbaik berdasarkan indikator statistik, yaitu *Adjusted R-Square*, *Predicted R-Square*, *Mallow Cp*, serta Standar Error (S) yang rendah.
5. Membentuk model regresi linear dari variabel yang terpilih, sehingga diperoleh nilai koefisien regresi yang menggambarkan arah (+/-) dan besar pengaruh masing-masing kandungan mineral terhadap HGI.
6. Menguji setiap variabel menggunakan nilai p-value, dengan ketentuan p-value < 0,05 menunjukkan pengaruh signifikan terhadap HGI, sedangkan p-value > 0,05 menunjukkan pengaruh yang tidak signifikan.
7. Menginterpretasikan hasil analisis regresi dan membandingkannya dengan teori atau literatur untuk memastikan kesesuaian antara hasil penelitian dan sifat mineral terhadap grindability batu gamping.

2.4 Bagan Alir Penelitian

