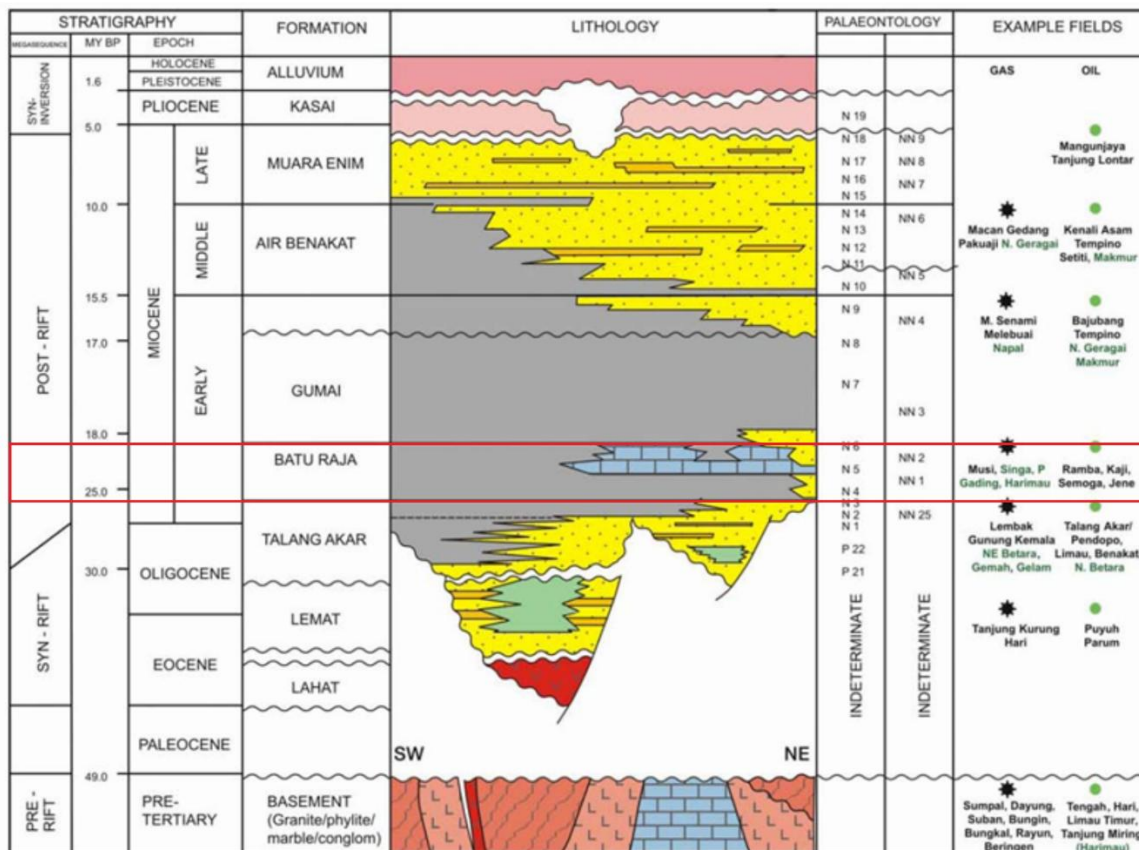


BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas mengenai kajian pustaka terdahulu mengenai studi diagenesis batugamping Formasi Baturaja pada daerah penelitian. Kajian pustaka mencakup pembahasan mengenai rujukan yang digunakan dalam melakukan identifikasi batugamping daerah penelitian untuk menentukan proses dan produk diagenesis, serta lingkungan diagenesis batugamping Formasi Baturaja Kecamatan Lengkiti dan Sekitarnya, Kabupaten Ogan Komering Ulu, Sumatera Selatan.

2.1 Formasi Baturaja

Formasi Baturaja (Tmb) pada daerah penelitian termasuk kedalam Cekungan Sumatera Selatan akibat pengaruh interaksi antara Paparan Sunda dan Lempeng Samudera Hindia. Formasi Baturaja mengalami pengendapan pada kala Miosen Awal ketika terjadinya transgresi yang menyebabkan berkembangnya produksi karbonat sehingga terendapkan secara selaras di atas Formasi Talangakar (Tomt). Ketebalan pengendapan sedimen Formasi Baturaja mencapai 3570 meter di bawah permukaan (Panggabean, 2012). Litologi penyusun yang membentuk formasi ini terdiri dari batugamping terumbu serta batugamping kalkarenit dengan sisipan berupa serpih gampingan dan juga napal. Formasi ini terendapkan pada lingkungan laut dangkal yang memungkinkan pertumbuhan terumbu karang secara signifikan (Ginger, 2005).



Lokasi Penelitian

Gambar 2.1 Stratigrafi Regional Daerah Penelitian (Ginger & Fielding, 2005)

Formasi Baturaja didominasi oleh batugamping dengan variasi litologi seperti *mudstone*, *wackstone*, *packstone*, *grainstone*, dan *boundstone*, serta fragmen foraminifera bentonik yang melimpah. Secara litologi Formasi Baturaja tersusun dari dua fasies utama, yaitu Fasies *Mudstone-Wackestone* dan Fasies *Wackstone-Packstone*. Fasies *Mudstone-Wackestone* dikelompokkan pada lingkungan pengendapan zona terumbu, yaitu *Back Reef Inner Lagoon*, sedangkan Fasies *Wackstone-Packstone* dikelompokkan pada lingkungan pengendapan zona terumbu, yaitu *Back Reef Outer Lagoon* (Sembiring, 2022). Dalam konteks eksplorasi hidrokarbon Formasi Baturaja merupakan salah satu reservoir potensial di Cekungan Sumatera Selatan. Sifat fisik pada batugamping Formasi Baturaja mendukung kapasitas penyimpanan dan aliran fluida, sehingga menjadi target utama dalam kegiatan eksplorasi minyak dan gas yang potensial.

2.2 Batuan Karbonat

Penelitian ini berfokus pada litologi batugamping yang merupakan salah satu bagian dari batuan karbonat. Batuan karbonat termasuk kedalam jenis batuan sedimen dengan kandungan material karbonat lebih dari setengah terhadap seluruh material penyusunnya. Batuan ini dapat tersusun oleh partikel karbonat klastik yang mengalami sementasi maupun partikel karbonat kristalin yang terbentuk akibat presipitasi (Reijer, 1986; Kusnanda, 2019). Secara sederhana batuan karbonat didefinisikan sebagai batuan dengan kandungan jumlah material karbonat yang lebih banyak dibandingkan dengan material *Non*-karbonatan (Pettijohn, 1975). Komposisi kimia batuan karbonat mencakup senyawa karbonat yang terbentuk akibat reaksi kimia antara ion karbonat (CO_3^{2-}) dan kation logam seperti kalsium, magnesium, besi, dan barium. Analisis pembahasan komposisi kimia kristal karbonat dijelaskan lebih rinci oleh (Tucker, 1990) pada tabel di bawah ini (Tabel 2.1).

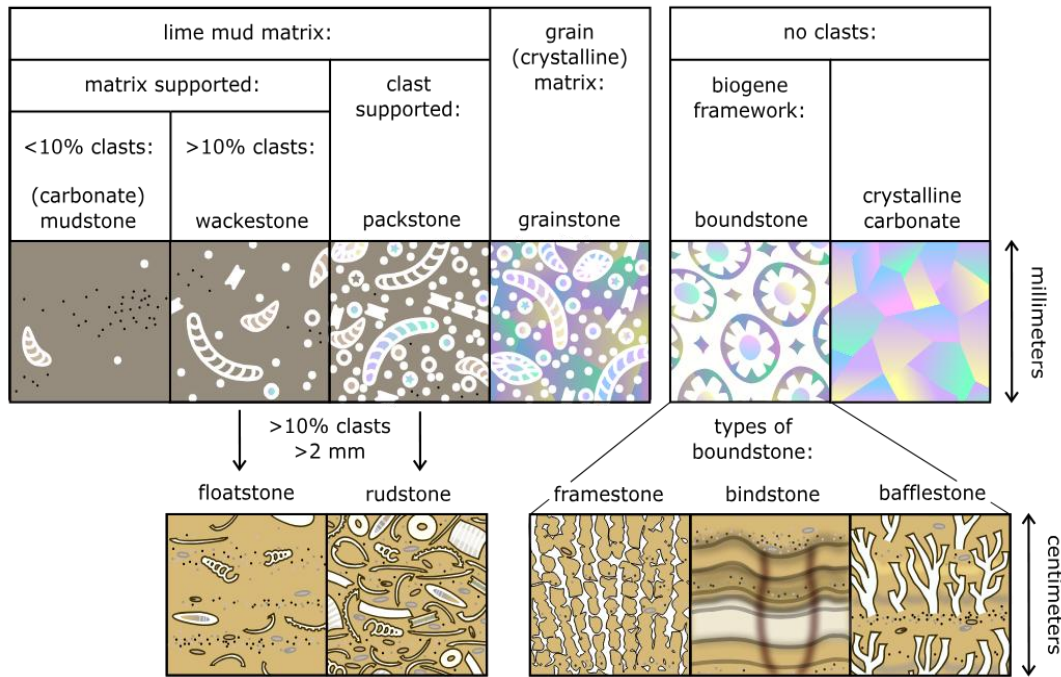
Tabel 2.2 Mineral – Mineral Penyusun Batuan Karbonat (Tucker & Wright, 1990; Kusnanda, 2019)

Mineral	Sistem Kristal	Rumus Kimia	Keterangan
Kelompok Kalsit			
Kalsit	Rhombohedral	CaCO_3	Kristal kalsit dapat muncul sebagai kristal euhedral – anhedral dan cenderung menunjukkan tekstur rekristalisasi pada lingkungan diagenesis
Magnesit	Rhombohedral	MgCO_3	Kehadiran magnesit dapat mengindikasikan adanya proses diagenesis pada batuan dolomitik dalam kondisi kaya magnesium
Rhodochrosite	Rhombohedral	MnCO_3	Kehadiran rhodochrosite umumnya berkaitan dengan proses alterasi atau diagenesis pada batuan yang kaya mangan pada lingkungan laut maupun air tawar
Siderit	Rhombohedral	FeCO_3	Kehadiran siderit dalam batugamping dapat menunjukkan proses diagenesis yang terjadi pada kedalaman yang cenderung rendah dan dengan suhu dan tekanan yang relatif moderat

Smithsonite	Rhombohedral	ZnCO ₃	Kehadiran smithstone dapat mengindikasikan kondisi diagenetik dengan kandungan seng yang tinggi dan lingkungan dengan tingkat kelembapan yang tinggi
Kelompok Dolomit			
Dolomit	Rhombohedral	CaMg(CO ₃) ₂	Dolomitisasi dapat terjadi akibat pengaruh air laut atau air tanah dengan kandungan magnesium yang tinggi pada lingkungan yang relatif basah
Ankerit	Rhombohedral	Ca(Mg, Fe, Mn)(CO ₃) ₂	Kehadiran ankerit dapat menunjukkan adanya kondisi lingkungan yang kaya besi dan mengindikasikan kondisi kimia yang lebih reduktif selama proses litifikasi
Kelompok Aragonit			
Aragonit	Orthorombic	CaCO ₃	Kehadiran aragonit dalam batuan mengindikasikan adanya proses diagenesis yang lebih awal atau kondisi geokimia tertentu, seperti kondisi air laut yang jenuh kalsium.
Cerussit	Orthorombic	PbCO ₃	Kehadiran cersusit dalam batuan karbonat dapat menunjukkan lingkungan oksidasi atau proses alterasi yang terjadi setelah pengendapan bijih timbal sulfida.
Strontionit	Orthorombic	SrCO ₃	Kehadiran strontionit dalam batuan karbonat dapat mengindikasikan pengaruh air yang mengandung ion stronsium dalam proses pengendapan atau penggantian mineral.
Witherit	Orthorombic	BaCO ₃	Kehadiran witherit dapat menunjukkan kondisi lingkungan yang kaya barium, yang terjadi pada lingkungan hidrotermal atau sedimen laut dangkal yang mengandung unsur barium.

2.2.1 Klasifikasi Batuan Karbonat

Klasifikasi batuan karbonat digunakan untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan nama, jenis, komponen penyusun pada batuan karbonat yang terbentuk pada daerah penelitian. Klasifikasi ini digunakan untuk menginterpretasi lingkungan pengendapan dan sejarah diagenesis batuan karbonat pada daerah penelitian. Dalam penelitian ini, klasifikasi batuan karbonat pada daerah penelitian mengacu pada klasifikasi yang dikemukakan oleh (Dunham, 1962) dan (Embry & Klovan, 1971). Klasifikasi (Dunham, 1962) didasarkan pada tekstur pengendapan batugamping yang nampak pada sayatan tipis (*thin section*) batuan. Tekstur batugamping yang terpreservasi dalam sayatan tipis batuan karbonat menggambarkan genesa pembentukannya, dimana dasar klasifikasi batuan karbonat oleh (Dunham, 1962) diidentifikasi berdasarkan kehadiran lumpur karbonat (mikrit maupun spart), butiran (fragmen), komponen yang mengikat, serta kristalin batuan karbonat (Gambar 2.1).

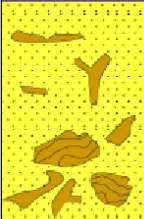

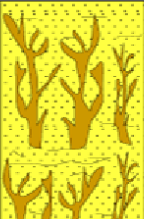
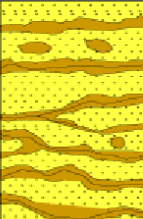
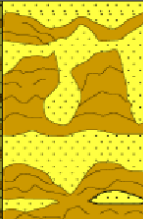


Gambar 2.2 Klasifikasi Batuan Karbonat Berdasarkan Pada Kehadiran Lumpur dan Butiran (Dunham, 1962)

Dalam klasifikasi ini batugamping terbagi menjadi empat kategori utama, yaitu *mudstone*, *Wackestone*, *packstone*, *grainstone*, *boundstone*, dan kristalin. Fasies *Mudstone* dicirikan dengan adanya karakteristik berupa ukuran butir yang halus dan keterdapatannya fragmen dengan jumlah lebih dari 10%. Fasies *Wackestone* dicirikan dengan adanya karakteristik berupa fragmen klastik dengan persentase lebih dari 10%, memiliki ukuran semen yang sangat halus (*alutit*), kondisi antar butiran tidak saling bersentuhan dan mengambang dalam matriks penyusunnya. Fasies *Packstone* dicirikan dengan adanya karakteristik berupa melimpahnya lumpur karbonat namun tetap didominasi oleh butiran (*grain*) dengan persentase lebih dari 10%, dimana antar butiran saling bersinggungan (*grain supported*). Fasies *Grainstone* dicirikan oleh butiran yang ukurannya kurang dari 2 mm, tidak memiliki keterdapatannya matriks di fasies, dan antar butiran yang saling bersinggungan (*grain supported*). Fasies *Boundstone* dicirikan oleh adanya pengikatan material organik selama proses pengendapan yang terbentuk oleh organisme pengikat, seperti karang atau alga. Fasies Batugamping Kristalin yang tidak lagi dapat memperlihatkan tekstur pengendapan akibat kristalisasi yang terjadi.

Adanya perubahan material penyusun batugamping akibat adanya pengaruh energi dan material sedimen yang tertransportasi dan terakumulasi menciptakan klasifikasi baru yang menyempurnakan yang telah lampau, yaitu klasifikasi (Embry & Klovan, 1971). Klasifikasi Embry dan Klovan (1971) membagi batugamping menjadi dua kelompok, yaitu *allochthonous* dan *autochthonous* (Gambar 2.2). *Allochthonous* adalah kelompok batugamping yang komponen penyusunnya tidak mengalami pengikatan selama proses pengendapan berlangsung. Komponen penyusun batuan kelompok ini berasal dari sumber yang mengalami transport dan terendapkan kembali. Klasifikasi (Embry & Klovan, 1971) membagi *boundstone* menjadi tiga

kelompok berdasarkan komponen penyusun utamanya, yaitu berupa terumbu yang berfungsi sebagai perangkap sedimen. Klasifikasi ini terbagi menjadi tiga jenis batugamping yaitu *framestone*, *bindstone*, dan *Bafflestone*. Litologi dengan ukuran komponen penyusun yang lebih besar dari 2 mm dengan persentase lebih dari 10% juga masuk dalam klasifikasi ini, yaitu *rudstone* untuk batuan karbonat dengan kandungan butiran yang mendominasi (*grain supported fabric*) dan *floatstone* untuk batuan karbonat dengan kandungan matriks yang mendominasi (*matrix supported fabric*).

Allochthonous		Autochthonous		
Original components not bound organically at deposition		Original components bound organically at deposition		
>10% grains > 2mm				
Matrix supported	Supported by >2mm component	By organisms that act as baffles	By organisms that encrust and bind	By organisms that build a rigid framework
Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone
				

Gambar 2.3 Klasifikasi Batuan Karbonat Berdasarkan Tekstur Pengendapan, Tipe Butiran dan Ukuran Butiran (Embry & Klovan, 1971)

Klasifikasi (Embry & Klovan, 1971) menambahkan lima kategori fasies baru dalam penyempurnaannya terhadap klasifikasi (Dunham, 1962), yaitu *floatstone*, *rudstone*, *Bafflestone*, *bindstone*, dan *framestone*. Fasies *Floatstone* memiliki karakteristik butiran dengan fragmen kerangka organik (*skeletal grain*) dengan kandungan lebih dari 10% yang terdispersi dalam matriks karbonat. Fasies *Rudstone* memiliki karakteristik dengan ukuran butir lebih dari 2 mm akibat hasil rombakan dari batugamping terumbu yang mengalami transportasi dan mengalami pengendapan kembali, fasies ini berasosiasi dengan terumbu. Fasies *Bafflestone* memiliki karakteristik butiran yang tersusun dari kerangka organik (*skeletal grain*) seperti koral, yang masih berada dalam posisi tumbuh tegak (*growth position*), dimana koral tersebut berfungsi sebagai *baffle* yang menangkap lumpur karbonat sehingga kemudian mengisi rongga-rongga di antara kerangkanya. Fasies *Bindstone* memiliki karakteristik butiran berupa kerangka (*skeletal*) atau pecahan yang telah mengalami proses pengikatan oleh lapisan gamping berkerak (*encrusting*) yang dihasilkan oleh ganggang merah dan organisme lainnya. Sementara itu, Fasies *Framestone* didominasi oleh kerangka organik (*skeletal grain*) seperti koral dan alga dengan kandungan matriks kurang dari 10% dan tersusun oleh sparry calcite (sparit).

2.2.2 Klasifikasi Lingkungan Pengendapan Batuan Karbonat

Lingkungan pengendapan merupakan sebuah area dimana tempat terjadinya akumulasi sedimen dengan kondisi fisik, kimia, dan biologis tertentu yang mengontrol karakteristik endapan yang terbentuk. Lingkungan pengendapan ini dikendalikan oleh berbagai faktor, seperti energi fluida, sumber sedimen, iklim, dan aktivitas biologis (Nichols, 2009). Klasifikasi ini membagi lingkungan pengendapan menjadi tiga kategori utama, yaitu lingkungan kontinental (terrestrial), lingkungan transisi, dan lingkungan laut. Setiap lingkungan ini memiliki karakteristik yang khas dalam proses pengendapannya sehingga menentukan jenis batuan sedimen yang akan terbentuk.

Lingkungan kontinental mencakup wilayah daratan yang dipengaruhi oleh berbagai proses pengendapan, seperti aliran sungai, angin, dan gletser. Lingkungan ini memiliki dinamika sedimentasi yang beragam, bergantung pada energi fluida dan tipe transportasi sedimen yang terjadi. Beberapa sub-lingkungan utama dalam lingkungan kontinental adalah:

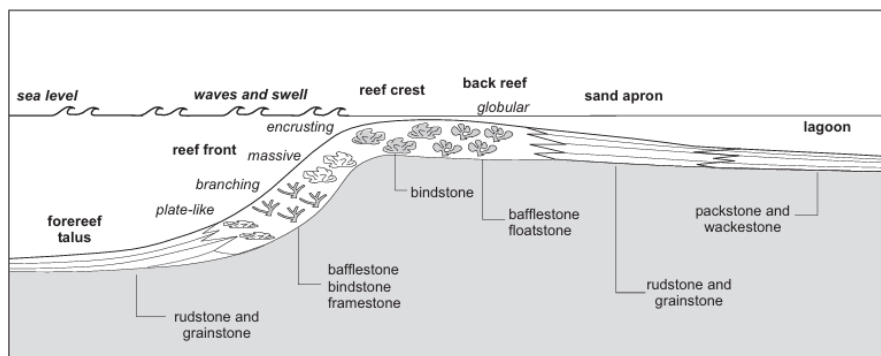
- **Fluvial (Sungai):** Lingkungan ini terbentuk oleh sistem aliran sungai yang mengangkut dan mengendapkan sedimen di sepanjang jalurnya. Endapan fluvial umumnya terdiri dari pasir, kerikil, dan lumpur yang bervariasi dalam ukuran butir dan menunjukkan struktur sedimentasi seperti laminasi silang-siur, imbrikasi, serta struktur grading yang khas. Sungai dapat diklasifikasikan menjadi sungai anyaman (*braided river*), meandering, dan anastomosing, yang masing-masing memiliki pola pengendapan yang berbeda.
- **Aeolian (Angin):** Proses pengendapan ini terjadi di lingkungan gurun dan daerah kering lainnya, di mana angin berperan sebagai agen utama transportasi sedimen. Endapan aeolian didominasi oleh pasir halus hingga sangat halus yang membentuk bukit pasir (*dunes*), loess, dan lembaran pasir (*sand sheets*). Struktur sedimen khas yang ditemukan di lingkungan ini adalah laminasi silang-siur yang terbentuk akibat migrasi bukit pasir oleh hembusan angin.
- **Lacustrine (Danau):** Lingkungan ini melibatkan akumulasi sedimen di perairan tenang seperti danau, dengan dominasi endapan halus seperti lempung, lanau, dan batulumpur. Endapan lacustrine sering menunjukkan perlapisan yang sangat tipis (*varves*), terutama di danau yang mengalami perubahan musiman. Selain itu, lingkungan ini juga sering mengandung material organik yang dapat berkembang menjadi batuan kaya organik seperti serpih minyak.
- **Glacial:** Lingkungan pengendapan glasial terbentuk akibat aktivitas gletser yang mengangkut dan mengendapkan material sedimen dalam berbagai ukuran. Endapan glasial cenderung tidak terpilah dengan baik dan terdiri dari campuran lempung, pasir, kerikil, hingga bongkah besar (diamiktit). Tipe utama endapan glasial meliputi *till* (endapan langsung dari es gletser), *outwash* (endapan dari aliran air lelehan gletser), dan *varves* (perlapisan halus yang terbentuk di danau glasial).

Lingkungan transisi merupakan zona peralihan antara lingkungan darat dan laut, di mana proses pengendapan dipengaruhi oleh interaksi antara energi fluvial, pasang surut, dan gelombang laut. Beberapa contoh lingkungan transisi yang utama adalah:

- Delta: Delta terbentuk di muara sungai tempat aliran air sungai bertemu dengan badan air yang lebih besar, seperti laut atau danau, menyebabkan pengurangan energi transportasi dan pengendapan sedimen. Delta memiliki tiga zona utama: delta plain (darat), delta front (peralihan), dan prodelta (laut). Sedimen yang diendapkan dalam delta bervariasi dari pasir hingga lempung, dengan struktur seperti *cross-bedding*, *ripples*, dan *laminasi sejajar*.
- Estuari: Estuari adalah wilayah di mana air sungai dan air laut bercampur, menciptakan kondisi lingkungan dengan salinitas yang bervariasi. Proses pengendapan di estuari dipengaruhi oleh arus pasang surut, menghasilkan endapan berbutir halus seperti lanau dan lempung, serta struktur sedimen seperti *flaser bedding* dan *wavy bedding*.
- Lagun: Lagun adalah perairan dangkal yang terisolasi dari laut terbuka oleh penghalang alami seperti gosong pasir atau terumbu karang. Sedimen lagun biasanya berupa lumpur karbonat dan material organik, yang dapat menghasilkan batu gamping saat mengalami litifikasi.

Lingkungan laut mencakup wilayah dari zona pasang surut hingga laut dalam, di mana proses pengendapan dipengaruhi oleh arus laut, gelombang, dan sedimentasi dari daratan. Nichols membagi lingkungan laut menjadi beberapa sub-kategori berdasarkan kedalaman dan dinamika sedimentasinya:

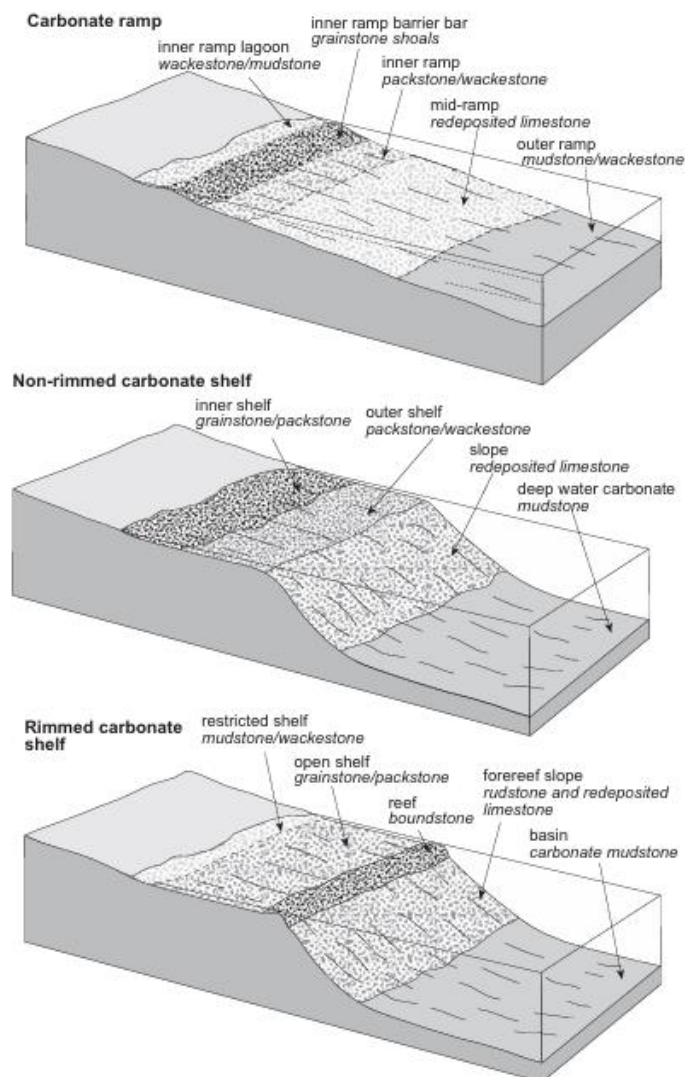
- Laut Dangkal (Shelf): Merupakan bagian dari landas kontinen yang relatif dekat dengan daratan dan dipengaruhi oleh gelombang serta arus pasang surut. Sedimen yang diendapkan di lingkungan ini meliputi pasir, lanau, dan lempung dengan struktur sedimen seperti *cross-bedding* dan *ripple marks*.
- Laut Dalam (Deep Marine): Lingkungan ini meliputi lereng benua hingga dasar laut dalam, yang sebagian besar menerima sedimen dari proses arus turbidit. Endapan khas di lingkungan ini adalah batupasir turbidit, serpih laut dalam, dan radiolarit. Ciri utama dari endapan turbidit adalah struktur *graded bedding* yang mencerminkan perubahan energi transportasi selama arus turbidit berlangsung.
- Terumbu Karang (Reefs): Lingkungan karbonat yang terbentuk di perairan tropis dangkal dengan dominasi organisme pembentuk terumbu seperti koral dan alga. Endapan karbonat di lingkungan ini biasanya terdiri dari batu gamping berpori dengan struktur seperti *stromatolit* dan *reefal facies*.



Gambar 2.4 Asosiasi Fasies Pada Zona Terumbu (Reefs) (Gary Nichols, 2009)

Lingkungan karbonat klastik (*Carbonate Clastic Environment*) merupakan lingkungan sedimentasi yang mengandung campuran material karbonat dan klastik. Lingkungan ini terbentuk pada daerah transisi antara lingkungan karbonat murni, seperti platform karbonat, dan lingkungan klastik, seperti delta atau estuari (Nichols, 2009). Material karbonat dalam lingkungan ini berasal dari organisme laut seperti koral, moluska, dan foraminifera, sementara material klastik berasal dari daratan melalui proses erosi dan transportasi oleh sungai atau angin. Umumnya, lingkungan karbonat klastik ditemukan di daerah pesisir, delta karbonat, atau laut dangkal yang masih mendapatkan suplai sedimen terrigenous dari daratan.









Secara fasies, lingkungan ini menghasilkan kombinasi antara batugamping bioklastik dan batupasir karbonatan dengan struktur sedimen seperti cross-bedding, graded bedding, wavy laminasi, maupun planar laminasi yang mencerminkan proses transportasi dan pengendapan oleh gelombang serta arus, dimana lumpur karbonat dapat terbentuk pada area yang lebih tenang. Dalam proses diagenesis, lingkungan ini mengalami sementasi oleh kalsit atau aragonit, rekristalisasi karbonat akibat tekanan dan perubahan lingkungan kimia, maupun dolomitisasi ketika didapatkan kandungan magnesium yang tinggi.



Gambar 2.5 Distribusi Fasies Batuan pada Lingkungan Karbonat (Gary Nichols, 2009)

2.2.3 Karakteristik Batuan Karbonat


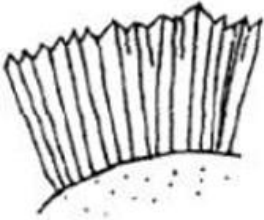
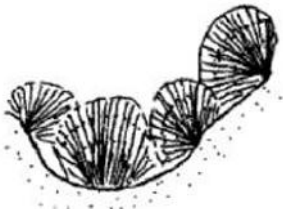
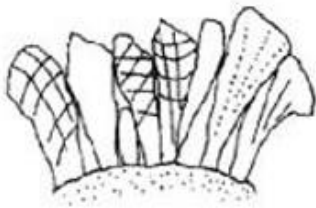
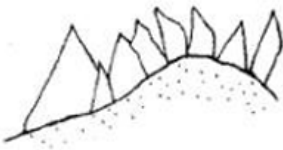
Batuan karbonat memiliki beberapa komponen utama yang dapat dibedakan berdasarkan asal dan teksturnya, batuan ini dapat diklasifikasikan berdasarkan keterdapatan kandungan komponen kerangka yaitu, *Skeletal grain*, serta komponen non-kerangka berupa *Non-skeletal grain* yang mencakup matriks karbonat dan semen karbonat sebagai penyusunnya (Tucker, 1991). Komponen kerangka (*framework*) didominasi oleh fosil atau bioklas, yang berasal dari sisa-sisa organisme seperti foraminifera, moluska, koral, alga, dan echinodermata. Selain itu, terdapat pisoid (2-10 mm) dan ooid (0,25-2,00 mm) yang merupakan butiran karbonat berbentuk bulat dengan lapisan konsentris akibat presipitasi kalsit di lingkungan air dangkal berenergi tinggi. Komponen lainnya adalah peloid, partikel karbonat kecil berbentuk bulat atau oval yang berasal dari reworking material organik atau mikroorganisme. Oncoid (butiran yang terlapisi alga atau mikroba kasar dengan ukuran >2 mm, berbentuk bulat dengan struktur laminasi konsentris yang tidak beraturan); Intraklas (fragmen sedimen karbonat yang telah mengalami erosi kemudian terendapkan kembali, biasanya dekat dengan sumbernya dalam urutan pengendapan yang sama (Folk, 1962)); Ekstraklas (partikel butiran dari batuan yang telah terbentuk sebelumnya lalu terlitifikasi bersama sedimen karbonat (*lithoclast*) biasanya berasal dari luar daerah pengendapan yang dipengaruhi oleh arus sedimentasi (Folk, 1962)). *Pellet* (butiran sedimen yang memiliki ukuran 0,03 – 0,3 milimeter, dengan bentuk seperti bola hingga lonjong yang tersusun dari mikrit, memiliki struktur internal yang sedikit dengan ukuran seragam, dalam arti lain *Pellet* berasal dari kotoran hasil dari aktivitas organisme invertebrate). *Peloid* (*allochem* dengan bentuk bulat, lonjong atau meruncing. Biasanya tersusun dari mikrit dan tidak memiliki struktur dalam).



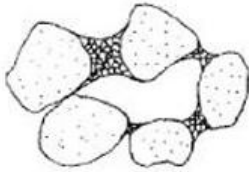


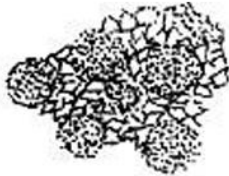
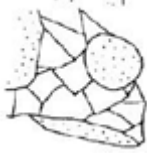

PELOIDS		Small micritic grains, commonly without internal structure. Subrounded, spherical, ovoid or irregular in shape. Size between <math><0.02</math> and about 1 mm, commonly 0.10 to 0.50 mm.	
COATED GRAINS	CORTOIDS		Rounded skeletal grains and other grains covered by a thin micrite envelope. Boundary between the central grain and the envelope indistinct. Size between <math><1</math> mm to a few centimeters.
	ONCOIDS		Large and small grains consisting of a more or less distinct nucleus (e.g. a fossil) and a thick cortex formed by irregular, non-concentric, partially overlapping micritic laminae. Laminae may exhibit biogenic structures. No tendency to increase sphericity during growth. Size from <math><1</math> mm to a few decimeters.
	OIDS		Spherical or ovoid grains, consisting of smooth and regular laminae formed as successive concentric coatings around a nucleus. Laminae may exhibit tangential and radial microfabrics. Size between 0.20 and about 2 mm, commonly between 0.5 and 1 mm.
	PISOIDS		Large subspherical and irregularly shaped grains, consisting of a mostly non-biogenic nucleus and a thick cortex formed by conspicuously, often densely spaced laminae exhibiting tangential and radial microfabrics. PISOIDS occur as isolated grains or are incorporated in crusts. Size generally >2 mm, up to >1 cm.
GRAIN AGGREGATES		Compound grains consisting of two or more originally separated particles (e.g. ooids, skeletal grains) that have been bound and cemented together, forming grape-like or rounded lumps. Intergrain spaces filled with micrite or spar. Outline irregular lobular or rounded. Size 0.5 to more than 2 mm.	
CLASTS		Synsedimentary or postsedimentary lime clasts, reworked partly consolidated carbonate sediment or already lithified material. Shape and size are highly variable: angular to rounded. Size ranges between <math><0.2</math> mm and several decimeters. Very small clasts are hardly distinguishable from peloids.	
SKELETAL GRAINS		Fragmented or complete skeletons of organisms. Size from 0.05 mm to many centimeters.	

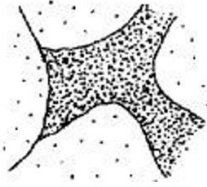
Gambar 2.6 Terminologi deskriptif dari *Allochem* (Flugel, 2004)

Selain komponen kerangka, batuan karbonat juga mengandung komponen non-kerangka, seperti mikrit dan sparit. Mikrit adalah matriks karbonat berukuran sangat halus yang biasanya terbentuk dari lumpur karbonat hasil presipitasi langsung, sedangkan sparit merupakan semen kalsit berukuran lebih besar yang mengisi pori-pori atau rekahan dalam batuan karbonat. Lumpur karbonat juga menjadi bagian penting, yang terbentuk dari material karbonat berukuran sangat halus akibat proses biogenik atau kimiawi. Mikrokrystalin (*micrite*) memiliki diameter antara 1 hingga 4 mikrometer dan terbentuk melalui proses pengendapan anorganik. Semen karbonat memiliki kenampakan yang jelas dan tampak tidak berwarna (*colourless*) saat diamati di bawah mikroskop polarisasi dengan pencahayaan PPL. Sementasi pada batuan karbonat menunjukkan beberapa kenampakan yang paling umum dijumpai (Tabel 2.2).

Tabel 2.3 Morfologi Semen Karbonat (Flugel, 2004)

Morfologi Semen	Keterangan
	Acicular: Kristal berbentuk jarum, tumbuh secara normal pada substrat. Pada umumnya berupa <i>aragonite</i> , namun tidak menutup kemungkinan Mg- kalsit. Mengindikasikan zona <i>marine phreatic</i> .
	Fibrous: Kristal fibrous, tumbuh normal pada substrat. Sering dijumpai pada pori inter-partikel dan intra- partikel. Aragonit atau high-Mg-kalsit. Pada umumnya terbentuk pada zona phreatic laut, namun terkadang dijumpai pada zona vadose meteorik dan laut (berbentuk lebih kolumnar).
	Botryoidal: semen pengisi pori yang dibentuk oleh mamelon yang saling menyatu dan menunjukkan horizon yang tidak kontiniu. Pada umumnya terbentuk di laut (umum dijumpai di gua pada terumbu dan slope terjal ke arah laut), namun kadang juga dijumpai pada lingkungan penimbunan.
	Radiaxial fibrous: berukuran besar, keruh dan kadang turbid, banyak dijumpai inklusi kristal kalsit dengan pepadaman bergelombang. Kristal menunjukkan pola unit subkristal. Terbentuk pada zona phreatic laut atau zona penimbunan.
	Dog tooth: Kristalkalsit yang menajam pada satu titik dengan bentuk scalenohedral atau rhombohedral. Sering dijumpai pada zona meteorik dan penimbunan dangkal namun juga dijumpai pada zona phreatic laut dan hidrotermal.

	<p>Bladed: Kristal yang <i>Non--</i>equidimensional dan <i>non-fibrous</i>. Terbentuk pada zona phreatic (banyak ditemukan pada laut dangkal) laut dan vadose laut.</p>
	<p>Pendant: semen yang dicirikan perbedaan tebal dari crust semen di bawah butir atau dibawah atap dari void. Terbentuk di bawah zona kapilaritas dan diatas <i>water table</i> di dalam zona vadose meteorik, namun juga pada zona phreatic meteorik.</p>
	<p>Meniscus: semen kalsit yang terpresipitasi dengan pola <i>meniscus</i> pada atau dekat kontak antar butir dalam pori yang mengandung baik udara danair. Biasa terbentuk pada zona vadosemeteorik namun juga hadir pada zona phreaticmeteorik dan vadose laut.</p>
	<p>Drusy: semen pengisi pori pada pori intergranular dan interkristal, mold dan kekar. Terbentuk di dekat permukaan meteorik danjuga lingkungan penimbunan.</p>
	<p>Granular: semen kalsit terdiri dari kristal-kristal kecil equidimensional yang mengisi pori. Terbentuk pada zona vadosemeteorik, phreaticmeteorik dan lingkungan penimbunan. Dapat juga terbentuk sebagai hasil rekristalisasi dari semen yang ada sebelumnya.</p>
	<p>Peloidal microcrystalline: Dicirikan oleh kemas <i>Peloidal</i> yang terdiri dari <i>Peloid-Peloid</i> mini (ukuran < 100 μm) di dalam matriks kristalin. Semen ini terbentuk di laut dangkal.</p>
	<p>Blocky: Semen kalsit yang terdiri dari kristal sedang hingga kasar. Pada umumnya terbentuk pada zona meteorik (vadose & phreatic) dan lingkungan penimbunan, sangat jarang ditemui di terumbu. Terpresipitasi setelah disolusi semen <i>aragonite</i> atau butiran karbonat. Dapat juga terbentuk sebagai hasil rekristlasisasi semen yang sudah ada sebelumnya.</p>
	<p>Syntaxial: pertumbuhan kristal yang dikontrol oleh substrat di sekitar butiran induk oleh satu kristal. Semen over growth yang biasa terbentuk di dekat permukaan laut kaya akan inklusi dan keabu-abuan, kontras dengan semen over growth.</p>



Microcrystalline: kristal rhombic dengan ukuran micron. Membentuk semacam selimut tipis di sekitar butir, mengisi pori secara penuh atau membangun semacam jembatan antar butir (berkontribusi dalam pembentukan semen *meniscus*). Mg- kalsit. Seringkali berasosiasi dengan semen *Peloidal*. Terbentuk pada meteorik vadose.

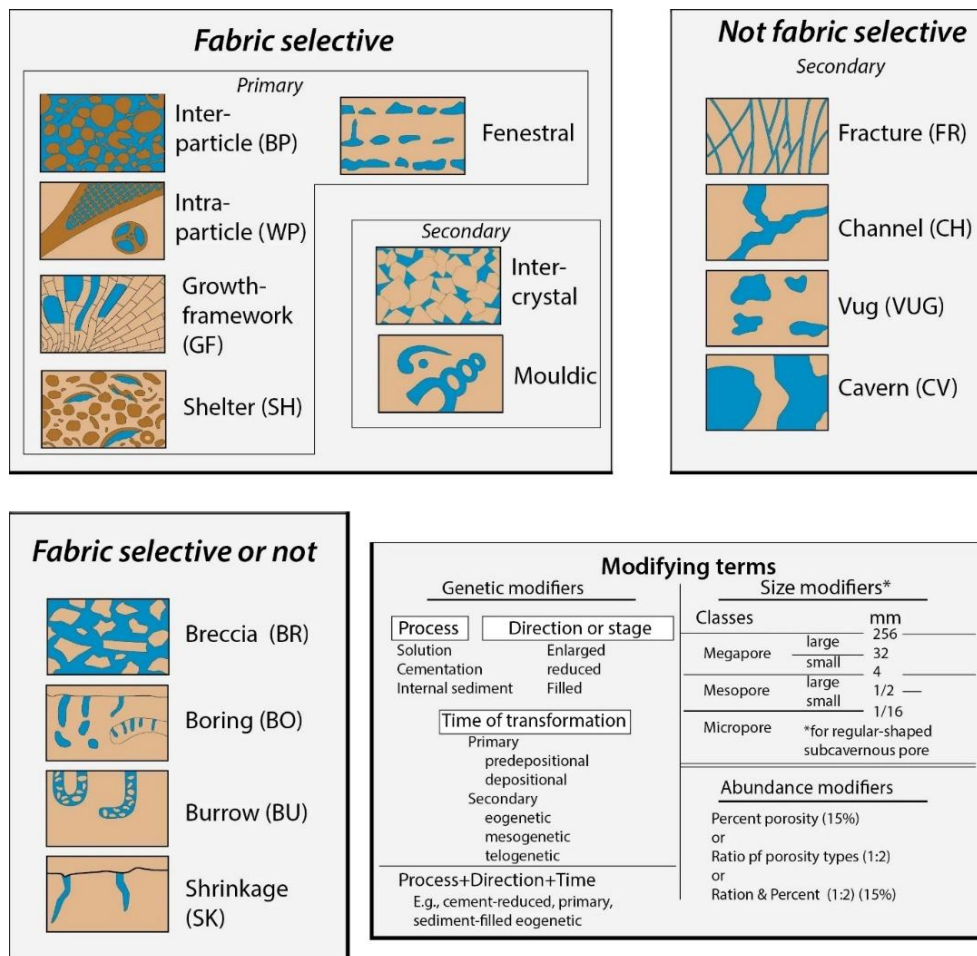
2.2.4 Tipe Porositas Batuan Karbonat

Porositas batuan merupakan suatu ruang kosong atau rongga dalam suatu batuan untuk dapat menampung fluida. Porositas menunjukkan sifat fisis yang dapat menggambarkan jumlah fluida yang terakumulasi dalam sebuah batuan. Porositas batuan karbonat dikelompokkan berdasarkan asal, bentuk, dan genesa keterbentukannya (Choquette & Pray, 1970). Berdasarkan (Choquette & Pray, 1970) adapun tipe-tipe porositas batuan karbonat tersebut, sebagai berikut:

1. *Fabric Selective Porosity*, tipe porositas ini dikontrol sepenuhnya oleh kemas batuan karbonat. *Fabric Selective Porosity* terbagi beberapa jenis, yaitu:
 - a. Interparticle, porositas primer yang terbentuk di antara butiran-butiran penyusun batuan sedimen. Porositas ini terjadi ketika ruang antar partikel tidak sepenuhnya terisi oleh semen atau mineral lain selama proses diagenesis
 - b. Intercrystalline, jenis porositas yang terjadi di antara batas-batas kristal dalam batuan atau mineral. Porositas ini umum ditemukan pada batuan yang mengalami rekristalisasi selama proses diagenesis.
 - c. Mouldic, jenis porositas sekunder yang terbentuk akibat pelarutan selektif terhadap butiran atau komponen tertentu dalam batuan, meninggalkan rongga berbentuk cetakan (mould). Terbentuk akibat pelarutan butiran atau fosil dalam batuan karbonat, seperti cangkang organisme atau fragmen skeletal.
 - d. Fenestral, jenis porositas primer atau sekunder yang berbentuk rongga-rongga kecil yang tidak teratur, biasanya terbentuk akibat aktivitas biologis atau proses fisik dalam lingkungan pengendapan karbonat. Terbentuk dalam lingkungan pasang surut atau supratidal, sering kali akibat jebakan gas atau aktivitas organisme. Umumnya terdapat dalam batuan karbonat seperti mudstone, wackestone, atau stromatolit.
 - e. Shelter, jenis porositas primer yang terbentuk ketika butiran-butiran besar (seperti fragmen fosil atau bioklas) menciptakan ruang pelindung (shelter) yang mencegah pengisian penuh oleh sedimen halus atau semen karbonat selama pengendapan. Terjadi di bawah atau di antara butiran besar, terutama fragmen fosil, cangkang moluska, atau bioklas lainnya. Terbentuk saat pengendapan ketika butiran besar menciptakan ruang kosong yang tidak langsung diisi oleh material halus.
 - f. Growth Framework, jenis porositas primer yang terbentuk di antara struktur kerangka organisme, terutama pada batuan karbonat yang berasal dari lingkungan terumbu (reefal). Porositas ini muncul saat organisme seperti

karang, bryozoa, atau alga membentuk struktur rangka yang menciptakan ruang terbuka di antaranya.

2. *Not-Fabric Selective Porosity*, tipe porositas ini tidak dipengaruhi maupun dikontrol oleh kemas batuan karbonat. *Not-Fabric Selective Porosity* terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:
 - a. Fracture, jenis porositas sekunder yang terbentuk akibat rekahan dalam batuan, baik yang dihasilkan oleh proses tektonik, pelarutan, atau perubahan tekanan selama diagenesis. Terbentuk setelah litifikasi batuan akibat gaya tektonik, perubahan tekanan, atau pelarutan. Dapat meningkatkan permeabilitas batuan, terutama jika rekahan saling terhubung membentuk jalur aliran fluida.
 - b. Vug, jenis porositas sekunder yang terbentuk akibat pelarutan mineral atau fragmen batuan, menciptakan rongga-rongga besar (vugs) yang tidak selalu terhubung satu sama lain. Porositas ini sering ditemukan dalam batuan karbonat, terutama yang mengalami diagenesis lanjut seperti pelarutan atau dolomitisasi.
 - c. Channel merupakan jenis porositas sekunder yang terbentuk akibat pelarutan diferensial, menghasilkan jalur aliran fluida berbentuk saluran (channel) di dalam batuan. Porositas ini sangat penting dalam sistem reservoir karbonat karena dapat meningkatkan permeabilitas dengan menciptakan jalur aliran yang terkoneksi.
 - d. Cavern, porositas ini merupakan jenis porositas sekunder yang terbentuk akibat pelarutan besar-besaran pada batuan karbonat, menciptakan rongga besar (cavern) yang dapat berfungsi sebagai reservoir hidrokarbon atau air tanah. Terbentuk akibat pelarutan intensif, biasanya oleh air tanah asam dalam sistem karst. Rongganya sangat besar, jauh lebih besar dibandingkan porositas vugular atau kanal, bisa mencapai ukuran beberapa meter hingga puluhan meter.
3. *Fabric Selective or Not*, tipe porositas ini dapat dipengaruhi maupun tidak dipengaruhi oleh kemas batuan karbonat. *Fabric Selective or Not* terbagi menjadi beberapa jenis, yaitu:
 - a. *Breccia*, porositas ini terbentuk karena adanya proses retakan yang menyebabkan batuan hancur menjadi bongkah-bongkah kecil dan terbentuklah pori-pori yang berada di antaranya.
 - b. *Boring*, porositas ini terbentuk karena adanya aktivitas pemboran oleh organisme.
 - c. *Burrow*, porositas ini terbentuk karena adanya aktivitas organisme, seperti penggalian.
 - d. *Shrinkage*, terbentuk akibat hasil dari penciutan, dimana sedimen yang telah diendapkan menjadi kering dan menciut sehingga terjadi rekahan-rekahan yang dapat menimbulkan pori.



Gambar 2.7 Klasifikasi Tipe Porositas Batuan Karbonat (Choquette & Pray, 1970)

2.3 Diagenesis Batuan Karbonat

Istilah diagenesis berasal dari bahasa Yunani dia yang berarti "melalui" atau "di antara," dan genesis yang berarti "pembentukan" atau "asal-usul." Dalam konteks awal, istilah ini digunakan untuk menggambarkan transformasi atau perubahan yang terjadi pada batuan sedimen setelah pengendapannya, tetapi sebelum menjadi batuan yang sepenuhnya terkonsolidasi. Diagenesis merupakan suatu proses perubahan batuan sedimen yang meliputi perubahan fisika, biologi dan kimiawi setelah terjadinya litifikasi hingga batas proses metamorfisme dimulai (Schmidt, 1979; Zadrak et al., 2022). Diagenesis akan mulai terjadi pada suhu dan tekanan yang relatif rendah sehingga menghasilkan perubahan yang terekspresikan melalui perubahan komposisi mineralogi, tekstur, porositas, dan permeabilitas batuan. Hal ini mencakup perubahan yang terjadi pada mineral, tekstur, dan struktur pori batuan karbonat, dimana hal ini terjadi karena dipengaruhi oleh kondisi lingkungan yang meliputi tekanan, suhu, dan interaksi dengan fluida kimia di dalam pori. Proses ini berlangsung dimulai dengan tahap awal (eogenesis), hingga akhirnya batuan mengalami perubahan kimia lebih lanjut dalam kondisi yang lebih dalam (mesogenesis) atau saat batuan kembali mendekati permukaan (telogenesis) (Choquette & Pray, 1970; Immenhauser, 2021).

Proses diagenesa batugamping sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan pengendapannya, yaitu pada lingkungan laut, lingkungan meteorik, maupun lingkungan sub-

permukaan (burial environment). Lingkungan pengendapan akan mempengaruhi sifat akhir yang dimiliki batugamping yang telah mengalami diagenesis, mencakup sifat mineralogi, tekstur, maupun porositas dan permeabilitasnya yang akan berdampak pada potensinya sebagai reservoir. Namun apabila suatu batugamping telah mengalami kristalisasi maka batuan tersebut sudah tidak dapat lagi bertindak sebagai resevoir (Laraebi, 2017). Beberapa hal lain yang mengontrol terjadinya proses diagenesis adalah komposisi dan mineralogi sedimen asal, komposisi cairan pori dan kecepatan aliran fluida, faktor sejarah geologi dimana dalam hal ini dapat dipengaruhi oleh peristiwa perubahan permukaan air laut, dan iklim yang bekerja pada daerah penelitian. Pada iklim kering sementara batugamping di lingkungan air tawar cenderung terbatas dibandingkan dengan porositas primer yang terbentuk. Sedangkan pada iklim tropis, batugamping yang telah mengalami diagenesis seringkali memiliki porositas sekunder berupa vug dan moldic yang berkembang secara massif (Kusnanda, 2019).

2.3.1 Tahapan Diagenesis

Tahapan diagenesis batugamping merupakan proses terjadinya perubahan fisik, kimia, dan biologis yang terjadi pada suatu sedimen karbonat setelah pengendapan. Tahapan ini berlangsung dalam kondisi tekanan dan suhu rendah ($< 200^{\circ}\text{C}$) sehingga memengaruhi kualitas reservoir seperti porositas dan permeabilitas. Berdasarkan (Choquette & Pray, 1970; Flugel, 2004) tahapan terjadinya diagenesis terbagi menjadi 3 tahapan, yaitu:

1. Tahap Eogenesis (*Early Diagenesis*)

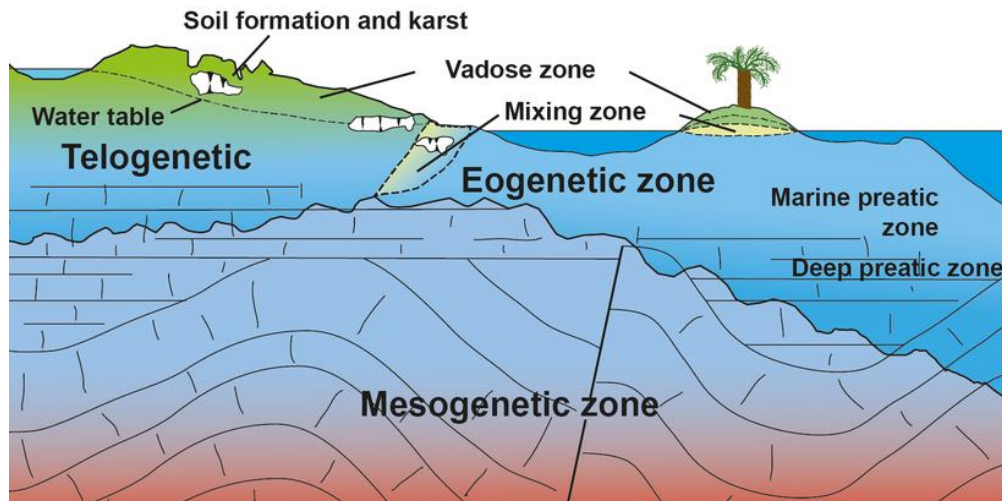
Tahapan ini terjadi pada saat sedimen terendapkan, dimulai ketika terjadinya penyusunan ulang komponen butir batuan. Tahapan ini terletak pada batas atas berupa permukaan dan batas bawah berupa *sea level*. Lingkungan diagenesis tahapan eogenik yaitu meliputi zona *marine*, zona meteorik dan *mixing zone*. Proses Eogenesis ini terjadi pada kedalaman yang cukup dangkal atau dekat dengan permukaan (kurang dari 2 kilometer) dengan temperature 0°C hingga 50°C . Proses yang dapat terjadi pada tahap ini adalah penimbunan sedimen di bawah beban (*overburden*) yang menyebabkan terjadinya kompaksi awal, presipitasi semen karbonat sehingga terbentuk mineral kalsit atau *aragonite* yang menutupi ruang pori, serta terbentuknya bioturbasi serta mikritisasi mikrobial akibat aktivitas organisme yang mempengaruhi struktur sedimen awal.

2. Tahap Mesogenesis (*Burial Diagenesis*)

Tahapan ini terjadi pada saat sedimen yang telah terendapkan mengalami pembebanan sehingga masuk semakin dalam ke lingkungan diagenesis *burial* atau penimbunan. Pada tahapan ini, dicirikan dengan lingkungan diagenesis *burial*. Lingkungan diagenesis *burial* ini terletak di bawah permukaan (*sub-surface*) dengan kedalaman 2 – 4 kilometer dan temperatur 50°C hingga 200°C . Proses yang terjadi pada tahap ini adalah pengurangan volume pori akibat bertambahnya beban akibat penimbunan sehingga terjadi kompaksi mekanik. Tekanan yang terjadi juga dapat menyebabkan terjadinya kompaksi kimiawi dimana terjadinya *pressure dissolution* yaitu pelarutan mineral pada titik kontak antar butiran akibat tekanan tinggi.

3. Telogenesis (*Uplift Diagenesis*)

Tahapan ini berlangsung ketika sedimen kembali terangkat ke permukaan akibat proses tektonik atau erosi sehingga terpapar lingkungan meteorik. Tersingkapnya batugamping ke permukaan dapat dipengaruhi oleh adanya peristiwa tektonik maupun proses pelarutan oleh air meteorik yang berlangsung pada daerah penelitian. Ciri khas tahap telogenesis yang terjadi akibat pengaruh air meteorik adalah terjadinya karstifikasi.



Gambar 2.8 Zona Tahapan Diagenesis (Choquette & Pray, 1970; Immenhauser, 2021)

2.3.2 Produk dan Proses Diagenesis

Diagenesis pada batugamping melibatkan berbagai mekanisme seperti kompaksi, presipitasi semen karbonat, rekristalisasi, dan pelarutan (Tucker & Wright, 1990; Aviandito, 2017). Mekanisme tersebut dapat terjadi akibat adanya pengaruh kondisi lingkungan seperti tekanan, suhu, serta komposisi fluida yang ada pada pori batuan. Proses diagenesis terjadi setelah pengendapan sedimen yang ditandai dengan terjadinya perubahan sifat fisik dan kimia pada batuan. Proses utama diagenesis pada batugamping ditandai dengan terjadinya mikritisasi mikrobial, kompaksi, sementasi, neomorfisme, dan pelarutan.

1. Mikritisasi Mikrobial

Proses ini menandakan telah terjadinya diagenesis awal, yang ditandai oleh butiran karbonat berupa pecahan cangkang atau bioklas yang terubahkan menjadi mikrit oleh aktivitas mikroorganisme, terutama alga dan bakteri. Proses ini dimulai dengan kolonisasi mikroorganisme pada permukaan butiran karbonat di mana mikroorganisme tersebut membentuk lapisan biofilm yang memengaruhi kondisi kimia di sekitarnya. Hal ini menyebabkan presipitasi kristal karbonat menjadi berukuran sangat halus (mikrokristalin). Mikritisasi mikrobial umumnya terjadi di lingkungan laut dangkal yang tenang, seperti laguna atau platform karbonat, tempat mikroorganisme dapat berkembang biak dengan baik. Hasil akhir dari proses ini adalah butiran karbonat yang dilapisi mikrit halus, hal ini dapat meningkatkan stabilitas mineral namun dapat mengurangi porositas dan permeabilitas batuan karbonat.

2. Kompaksi

Proses kompaksi pada diagenesis batugamping terjadi ketika bertambahnya tekanan dari beban sedimen yang menumpuk di atasnya. Kompaksi terbagi menjadi dua jenis utama, yaitu kompaksi mekanik dan kompaksi kimia. Kompaksi mekanik terjadi ketika butiran karbonat mengalami deformasi karena tekanan *overburden*. Proses ini menyebabkan pengurangan porositas primer, yaitu ruang antar butiran yang awalnya terbentuk selama pengendapan. Kompaksi kimia (*pressure dissolution*) terjadi pada tekanan yang lebih tinggi, di mana kontak antar butiran mengalami pelarutan akibat tekanan diferensial. Kompaksi kimia terjadi ketika antar butiran mulai larut dan menghasilkan kontak berupa kontak suture. Kompaksi kimiawi ini juga terjadi pada batugamping yang telah mengalami litifikasi dan membentuk lapisan pelarutan yang sering disebut *flasers*.

3. Sementasi

Proses sementasi pada diagenesis batugamping ditandai dengan terjadinya pengisian ruang pori oleh mineral karbonat yang mengendap dari larutan, hal ini menyebabkan terkonsolidasinya material sedimen. Sementasi umumnya terjadi akibat presipitasi mineral seperti kalsit, aragonit, atau dolomit dari air laut, air meteorit, atau fluida pori yang jenuh karbonat. Sementasi dapat terjadi di lingkungan laut dangkal (*marine*) maupun lingkungan meteorik. Semen karbonat biasanya terbentuk di sekitar butiran sebagai lapisan atau menutupi rongga-rongga pori sehingga mengurangi porositas dan permeabilitas batuan. Aragonit, *high-Mg calcite*, *low-Mg calcite* dan dolomit adalah jenis semen yang umum ditemukan pada batu gamping dan terdiri dari berbagai morfologi. Tipe semen yang sama dapat diendapkan pada lingkungan diagenesis yang berbeda. Tipe semen *equant* dan *drusy calcite spar* mengisi pori-pori utama pada batugamping, dapat diendapkan di lingkungan meteorik dekat permukaan atau di lingkungan *deep burial*. *High-magnesian calcite* dan *aragonite* merupakan jenis semen laut dangkal yang dominan. *High-magnesian calcite* adalah jenis semen yang dapat terbentuk sebagai kristal berukuran *micrite* dan mengisi ruang pori di antara butiran. Selain itu, jenis semen tersebut juga dapat berbentuk serat dan berbilah. Untuk semen *aragonite* umumnya berbentuk serat di sekitar butiran cangkang dan butiran karbonat lainnya (Boggs, 2009).

4. Neomorfisme

Proses neomorfisme pada diagenesis batugamping ditandai ketika terjadinya transformasi mineral karbonat yang melibatkan rekristalisasi atau perubahan fase dari satu mineral karbonat ke bentuk lain dengan komposisi kimia yang sama. Proses ini umumnya terjadi pada lingkungan meteorik maupun lingkungan *burial* yang dipengaruhi oleh tekanan, suhu, dan komposisi kimia fluida sehingga memicu transformasi. Proses ini dapat dicirikan dengan terjadinya pengkasaran ukuran kristal pada lumpur karbonat atau mikrit (*aggrading neomorphism*) maupun penggantian cangkang aragonit dan semen oleh kalsit (*calcitization*).

5. Pelarutan

Proses pelarutan pada diagenesis batugamping ditandai ketika terjadinya penghilangan sebagian mineral karbonat akibat interaksi dengan fluida yang kaya karbon dioksida (CO₂) atau asam organik. Proses ini terjadi ketika air pori mengalami *undersaturated* terhadap mineral karbonat, seperti kalsit atau aragonit sehingga mineral tersebut mulai

terlarut. Pelarutan dapat berlangsung di berbagai lingkungan diagenesis, seperti lingkungan meteorik (air tanah), laut dangkal, atau pada lingkungan penguburan dalam (*burial*).

2.3.3 Lingkungan Diagenesis

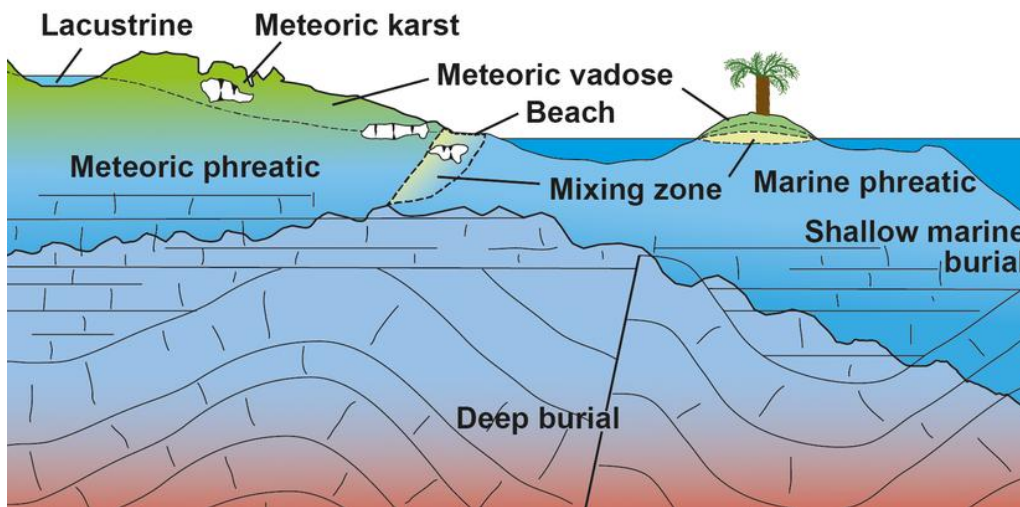
Lingkungan diagenesis mengacu pada tempat dan kondisi di mana proses diagenesis berlangsung. Lingkungan ini sangat memengaruhi jenis proses diagenesis yang terjadi dan produk akhirnya. Secara umum, lingkungan diagenesis dibagi menjadi tiga kategori utama: lingkungan *marine* (laut), meteorik (air tanah), dan *burial* (penguburan) (Gambar 2.6). Penentuan lingkungan diagenesis dilakukan melalui pengamatan terhadap kompleksitas tahapan diagenesis yang telah terjadi pada batuan tersebut (Tucker & Wright, 1990; Gold, 2018). Lingkungan pengendapan meteorik terbagi dalam tiga zona yang berbeda yaitu, meteorik freatik, meteorik vadose, dan meteorik karst, sedangkan lingkungan pengendapan *marine* terbagi menjadi *marine freatik* dan *shallow marine burial*, dan lingkungan *burial* yang terbagi menjadi *shallow burial* dan *deep burial*.

Diagenesis pada lingkungan meteorik terjadi ketika adanya interaksi antara batuan karbonat dengan air meteorik. Pada zona meteorik freatik pori-pori batuan akan jenuh dengan air karena zona ini terletak di bawah muka air tanah (*water table*). Lingkungan ini memiliki kondisi aliran air yang lambat dan tekanan yang konstan. Proses utama yang mencirikan lokasi pengendapan ini adalah terbentuknya produk diagenesis dapat berupa sementasi dan neomorfisme yang ditandai dengan kehadiran sparit maupun mineral hasil rekristalisasi.

Pada zona meteorik vadose pori-pori batuan tidak sepenuhnya jenuh dengan air karena zona ini terletak di atas muka air tanah (*water table*). Aliran air pada zona ini bergerak melalui rongga antar butiran yang dipengaruhi oleh gravitasi. Proses utama yang mencirikan lokasi pengendapan ini adalah terbentuknya produk diagenesis berupa sementasi dengan bentuk *pendant* dan *meniscus*, serta hadirnya pelarutan yang menciptakan rongga (porositas sekunder) berupa vug maupun *moldic*. Zona meteorik karst terletak pada permukaan maupun dekat permukaan dengan pelarutan batuan karbonat akibat aliran air yang intensif. Proses karstifikasi menyebabkan pelarutan besar-besaran pada batugamping sehingga membentuk rongga besar berupa goa.

Diagenesis pada lingkungan *marine* dipengaruhi oleh aktivitas dan kondisi kimia air laut. Pada zona *marine freatik* pori-pori batuan akan sepenuhnya terisi oleh air laut, hal ini disebabkan karena zona ini terletak di bawah permukaan air laut. Lingkungan ini memiliki aliran yang relative stabil dengan proses utama yang mencirikan adalah terbentuknya sementasi kristal karbonat berupa sparit atau mikrit dan mikritisasi mikrobial. Zona ini cenderung mengendapkan sedimen dengan ukuran butir yang halus (*mud supported*) karena energi yang relative lemah. Zona penguburan laut dangkal (*shallow marine burial*) terletak di bawah permukaan sedimen pada daerah laut dangkal. Pada zona ini tekanan sedimen mulai meningkat dan berkurangnya pengaruh aktivitas air laut. Proses utama yang mencirikan lingkungan pengendapan ini adalah terbentuknya produk diagenesis berupa kompaksi mekanik yang cenderung lemah ditunjukkan dengan terbentuknya *floating contact* dan *point contact*, serta sementasi.

Diagenesis pada lingkungan *burial* terjadi pada tahap ketika batuan karbonat terkubur lebih dalam seiring dengan bertambahnya tekanan. Zona *shallow burial* berada pada kedalaman yang relative dangkal dengan kedalaman 1 – 2 kilometer di bawah permukaan (Boggs, 2006). Tekanan dan temperature pada zona ini relatif rendah – sedang yaitu 50°– 70°C. Produk diagenesis yang dihasilkan pada lingkungan ini berupa kompaksi mekanik dan sementasi. Zona *deep burial* berada pada kedalaman 2 – 4 kilometer di bawah permukaan dengan temperature 70°– 200°C. Semakin meningkatnya kedalaman dan temperature akan menyebabkan semakin aktifnya reaksi kimia yang terjadi pada batuan. Hal ini menyebabkan terbentuknya produk diagenesis berupa sementasi, kompaksi yang intens ditandai dengan terbentuknya *stylolite* dan fraktur, serta pelarutan.



Gambar 2.9 Zona Lingkungan Diagenesis (Choquette & Pray, 1970; Immenhauser, 2021)