

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sedimentasi adalah proses pengendapan partikel-partikel padat yang terangkut oleh air, angin, atau es, yang kemudian mengendap di dasar suatu badan air atau di permukaan tanah. Proses ini terjadi ketika kecepatan aliran air atau angin menurun, sehingga partikel-partikel yang lebih berat tidak dapat tetap terangkut dan mulai mengendap. Tempat pengendapan sedimen dapat bervariasi tergantung pada lingkungan dan proses yang terlibat. Salah satu tempat dimana sedimen sering mengendap adalah di dasar danau dimana ketika aliran air melambat, partikel-partikel yang berat akan jatuh ke dasar (Norvell, 2016). Sedimen danau adalah material yang terendap di dasar danau, yang terdiri dari partikel-partikel seperti silt, clay, dan pasir. Sedimen ini dapat berasal dari erosi tanah, aliran sungai, dan aktivitas manusia, serta dapat mempengaruhi kualitas air dan ekosistem danau. Proses sedimentasi dapat mengurangi kapasitas danau seiring waktu, yang dapat mempengaruhi fungsi dan keberlanjutan danau tersebut (Jones & Rogers, 2011). Material-material sedimen yang diendapkan dapat berupa sedimen organik maupun sedimen anorganik. Sedimen organik merujuk kepada bahan-bahan yang berasal dari tumbuhan atau organisme lain yang telah melalui proses dekomposisi dan pengendapan di dalam sedimen. Bahan organik ini biasanya terdiri daripada sisa-sisa tumbuhan, organisme kecil, dan mikroorganisma yang telah terakumulasi serta terjaga dalam lapisan sedimen sedangkan sedimen anorganik adalah material yang terdiri dari partikel mineral dan senyawa yang tidak berasal dari organisme hidup, seperti pasir, kerikil, dan tanah liat. Sedimen ini terbentuk melalui proses pelapukan fisik dan kimia dari batuan, serta transportasi oleh air, angin, atau es (Cahill & Steele, 1986).

Untuk mengetahui perubahan kondisi lingkungan geologi yang telah terjadi pada suatu daerah, kita perlu mengetahui lingkungan pengendapan purba dari daerah tersebut. Lingkungan pengendapan purba mengacu pada kondisi geologi yang ada di masa lalu, yang berpengaruh pada cara dan lokasi akumulasi material sedimen. Lingkungan ini mencakup berbagai jenis habitat yang pernah ada, dan dapat mencerminkan proses fisik, kimia, serta biologi yang berlangsung pada waktu itu (Sasmito et al., 2018). Dalam hal ini, peneliti ingin mengetahui proses-proses geologi yang pernah terjadi di Danau Sidenreng pada masa lampau, maka dari itu peneliti melakukan penelitian tentang lingkungan pengendapan purba di Danau Sidenreng.

Danau Sidenreng sendiri terletak di Desa Teteaji, Kecamatan Tellu Limpoe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Secara geografis, lokasi danau ini berada pada koordinat 3°59'15,12" - 3°59'36,38" Lintang Selatan dan 119°50'15,22" - 119°50'42,36" Bujur Timur. Kajian mengenai lingkungan pengendapan purba di daerah ini bertujuan untuk mengetahui provenance dan proses geologi yang pernah terjadi di daerah penelitian sehingga dapat sangat membantu untuk perkembangan ilmu geologi kedepannya. Berdasarkan hal tersebut, peneliti melakukan penelitian dengan judul **Analisis Lingkungan Pengendapan Purba Danau Sidenreng, Kecamatan Tellu Limpoe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan.**

1.2. Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui Lingkungan Pengendapan Purba Danau Sidenreng Kecamatan Tellu Limpoe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan.

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui Umur sedimen di Danau Sidenreng berdasarkan data Palinologi
2. Mengetahui Lingkungan Pengendapan Purba sedimen Danau Sidenreng berdasarkan data geokimia dan palinologi.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian yang dilakukan di batasi pada analisis lingkungan pengendapan purba dengan menggunakan analisis geokimia dan data palinologi sampel *clay* yang di ambil dari dasar Danau Sidenreng.

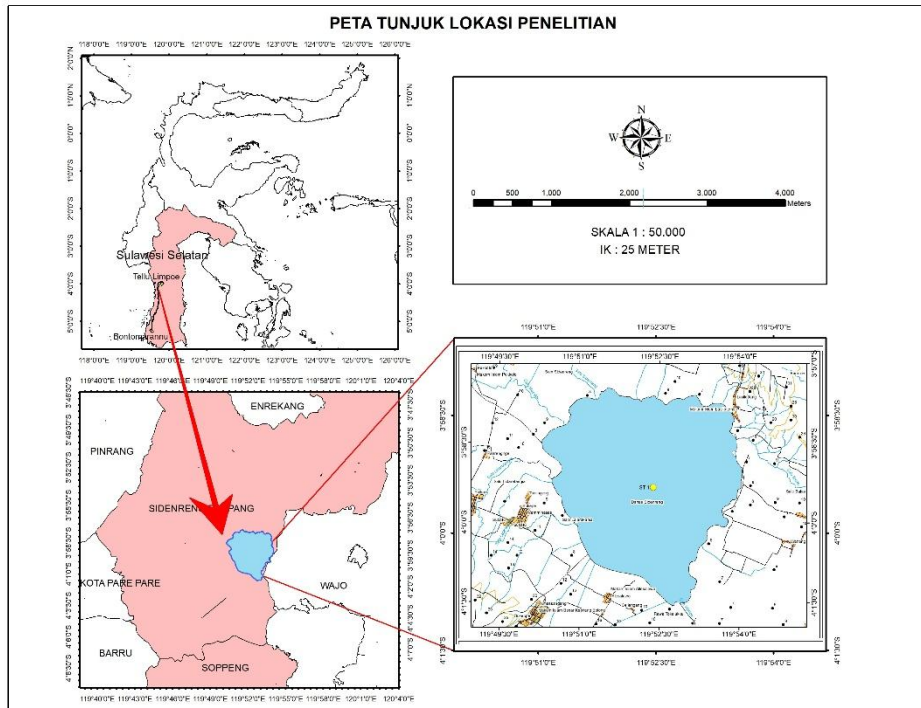
1.4. Letak Luas dan Kesampian Daerah

Secara administrasi Danau Sidenreng sendiri terletak di Desa Teteaji, Kecamatan Tellu Limpoe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan, Indonesia. Secara geografis, lokasi danau ini berada pada koordinat $3^{\circ}59'15,12''$ - $3^{\circ}59'36,38''$ Lintang Selatan dan $119^{\circ}50'15,22''$ - $119^{\circ}50'42,36''$ Bujur Timur.

Lokasi penelitian berada sekitar 190 kilometer ke arah utara dari Kota Makassar melewati Kabupaten Maros, Kabupaten Pangkep, Kabupaten Barru, dan Kotamadya Pare-Pare yang ditempuh selama kurang lebih 5 jam sampai ke lokasi penelitian. Lokasi penelitian dapat diakses menggunakan kendaraan roda dua maupun roda empat.

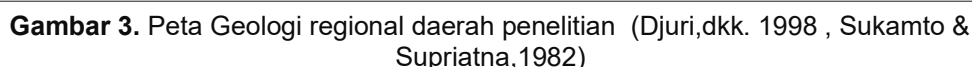


Gambar 1. Peta Citra Satelit Daerah Penelitian



Gambar 2. Peta Tunjuk Lokasi Daerah Penelitian

Geologi regional daerah penelitian termasuk dalam Peta Geologi Lembar Majene dan Bagian Barat Lembar Palopo, Sulawesi yang dibuat oleh Djuri, dkk (1998) dengan skala peta 1: 250.000 dan Peta Geologi Regional Lembar Pangkajene dan Watampone Bagian Barat oleh RAB Sukanto dan SAM Supriatna (1982). Berdasarkan peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dengan skala peta 1: 50.000, daerah penelitian termasuk dalam RBI Lembar Sidenreng nomor 2012-32 dan RBI Lembar Batu-batu nomor 2011-64.



Tmcv Anggota Batuan Gunungapi Formasi Camba: merupakan satuan batuan gunungapi yang bersisipan batuan sedimen laut. Penyusun formasi ini meliputi breksi gunungapi, lava, aglomerat, serta tufa berbutir halus hingga lapilli. Batuan ini juga bersisipan batupasir tufaan, batupasir gampingan, dan batulempung yang mengandung sisa tumbuhan, batugamping, serta napal. Komposisi batuannya didominasi oleh andesit

dan basal. Umumnya menunjukkan sedikit alterasi propilitik, Sebagian mengalami pengkersikan, serta memiliki struktur amygdaloidal dan berlubang-lubang. Batuan ini diterobos oleh retas, sill, dan stok yang berkomposisi basal dan diorit. Berdasarkan data fosil dan radiometri, formasi ini menunjukkan jangka umur Miosen Tengah-Miosen Akhir.

Tmpw Formasi Walanae: Batupasir berselingan batulanau, tufa, napal, batulempung, konglomerat, dan batugamping. Satuan ini tersebar luas di sepanjang Lembah Sungai Walanae, di sebelah timur Danau Tempe dan sekitar watampone. Umumnya, satuan ini menunjukkan perlipatan lemah dengan kemiringan lapisan kurang dari 15°, namun perlipatan kuat terjadi di sepanjang lajur sesar dengan kemiringan mencapai 60°. Bagian bawah formasi ini diperkirakan menjemari dengan formasi camba sedangkan bagian atasnya menjemari dengan formasi batuan gunungapi pare-pare. Berdasarkan interpretasi melalui fosil yang ditemukan, formasi ini menunjukkan umur miosen Tengah-Pliosen.

Tmsv Batuan Gunungapi Soppeng: breksi gunungapi dan lava, dengan sisipan berupa tufa berbutir pasir hingga lapilli, serta batulempung. Menindih tak selaras batugamping Formasi Tonasa dan ditindih selaras batuan Formasi Camba, dan diperkirakan berumur Miosen Bawah.

Tppv Batuan Gunungapi Pare-pare: tufa berbutir halus sampai lapilli, breksi, aglomerat, dengan sisipan lava serta batupasir tufaan. Menindih batuan Formasi Camba dan menjemari dengan bagian atas Formasi Walanae. Berdasarkan hasil interpretasi fosil dan hasil radiometri, formasi ini menunjukkan umur Pliosen.

Tppl Anggota Lava Batuan Gunungapi Pare-pare: Lava, trakit, berwarna kelabu muda hingga putih, dengan struktur kekar tiang.

2.5.2 *Paleoenvironment*

Paleoenvironment atau lingkungan purba adalah gambaran menyeluruh mengenai kondisi lingkungan pada masa lampau yang mencakup berbagai aspek alam yang membentuk kehidupan di bumi pada suatu periode geologi tertentu. *Paleoenvironment* tidak hanya menjelaskan seperti apa lingkungan fisik pada masa itu, tetapi juga bagaimana lingkungan tersebut memengaruhi keberadaan, persebaran, adaptasi, dan evolusi organisme purba. Lingkungan purba ini mencakup kondisi iklim seperti suhu, curah hujan, kelembapan, pola musim, serta kejadian ekstrem seperti kekeringan atau pendinginan global. Selain itu, mencakup pula bentang alam seperti pegunungan, dataran banjir, sungai, danau, rawa, gurun, hingga laut dangkal dan samudra yang menentukan tipe habitat yang tersedia bagi organisme. *Paleoenvironment* juga melibatkan ekosistem masa lampau, yaitu hubungan antara organisme purba dengan lingkungannya, termasuk interaksi antara predator dan mangsa, pola makan, migrasi, serta struktur komunitas biologis. Aspek ini memperlihatkan bagaimana organisme saling bergantung dan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan yang terjadi secara bertahap maupun tiba-tiba. Selain faktor biologis, paleoenvironment turut mempertimbangkan faktor fisik seperti komposisi atmosfer, kadar oksigen dan karbon dioksida, aktivitas vulkanik, pergerakan lempeng tektonik, perubahan muka laut, serta dinamika sedimen yang memengaruhi pembentukan habitat (Eudald Mujal, *Et.al.* 2025).

2.5.3 Lingkungan Pengendapan Purba

Lingkungan pengendapan purba adalah kondisi dan proses yang terjadi di masa lampau yang menghasilkan lapisan sedimen. Hal ini mencakup material yang terendapkan seperti pasir, lumpur, kerikil, serta faktor-faktor lingkungan seperti iklim, vegetasi, dan aktivitas geologis yang dahulu mempengaruhi pembentukan sedimen tersebut (Cortés. 2011).

Lingkungan pengendapan purba dapat diklasifikasikan berdasarkan kondisi fisik, kimia, dan biologis tempat terbentuknya bahan sedimen di masa lalu. Berikut beberapa klasifikasi utama lingkungan pengendapan purba (Society & Congress, 2001):

1. Lingkungan laut dangkal: terjadi di wilayah laut dangkal dan biasanya berada di sekitar pesisir atau gugusan pulau
2. Lingkungan laut dalam: terletak di kedalaman laut yang jauh dari Pantai, umumnya di wilayah samudra terbuka
3. Lingkungan delta dan estuaria: merupakan area peralihan dimana sungai bermuara ke laut, dengan akumulasi sedimen dari air tawar dan air laut
4. Lingkungan rawa dan lagun: merupakan lingkungan basah yang tertutup air, sering terbentuk di daerah pesisir yang datar dan dangkal
5. Lingkungan fluvial: merupakan lingkungan pengendapan yang terbentuk di sepanjang aliran sungai dan anak sungai
6. Lingkungan gua dan karts: terjadi di dalam atau sekitar gua yang terbentuk melalui proses pelarutan batuan karbonat.

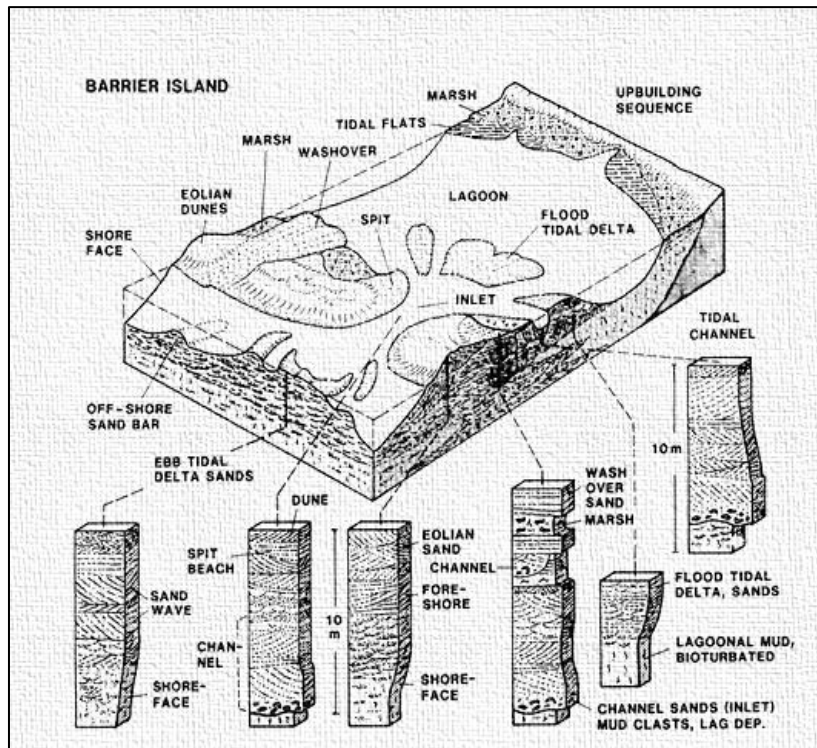
Menurut (Syaeful et al., 2024) pengelompokan lingkungan pengendapan berdasarkan karakteristik fisik dan kimianya antara lain:

1. Lingkungan pengendapan laut (*Marine Envoronments*)

Lingkungan ini biasanya mencakup area yang terpengaruh oleh air laut.

Dalam pengendapan laut, terdapat beberapa sub-lingkungan antara lain:

- a. *Shoreface*: area yang dekat pantai, dimana sedimen sering dipengaruhi oleh gelombang dan arus
- b. *Lagoon*: lingkungan tenang yang terletak di antara pantai dan barrier, dengan sedimen yang lebih halus dan seringkali mengandung karbonat
- c. *Tidal point bar*: dibentuk oleh air pasang surut, dengan sedimen yang lebih kasar dibandingkan *lagoon*

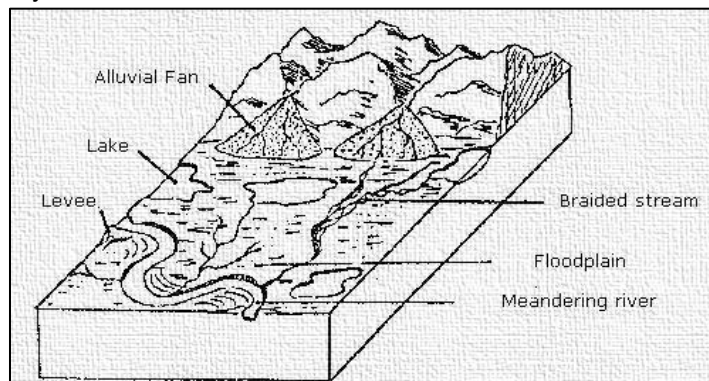


Gambar 4. skema rekonstruksi geomorfik lingkungan lagoon dan sekitarnya (Einsele, 1992 dalam Wibowo, 2013)

2. Lingkungan pengendapan fluvial (*Fluvial Environments*)

Lingkungan fluvial terkait dengan sungai dan aliran air tawar. Beberapa karakteristiknya meliputi:

- a. *Meandering river system*: sungai yang bergerak dalam pola berkelok, membentuk bar dan delta
- b. *Point bar*: area di dalam aliran sungai dimana sedimen diendapkan di sisi dalam kelokan
- c. *Floodplain deposits*: sedimen yang diendapkan selama banjir, sering kali kaya akan nutrisi

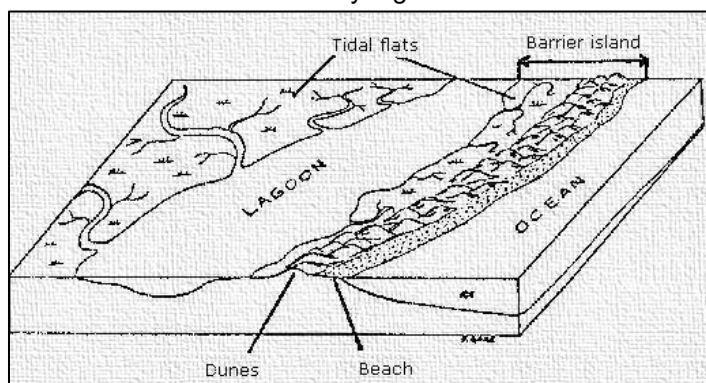


Gambar 5. Lingkungan pengendapan fluvial (Boggs, 1995 dalam Wibowo, 2013)

3. Lingkungan transisi

Lingkungan ini merupakan penghubung antara laut dan darat. Ciri cirinya meliputi:

- Deltanic environments*: terjadi di muara sungai, dimana sedimen dibawa dan diendapkan di laut
- Black mangrove*: lingkungan yang mendukung vegetasi mangrove, sering kali terpengaruh oleh pasang surut dan arus sungai
- Brackish water environments*: campuran air tawar dan air laut, biasanya memiliki karakteristik sedimen yang unik.



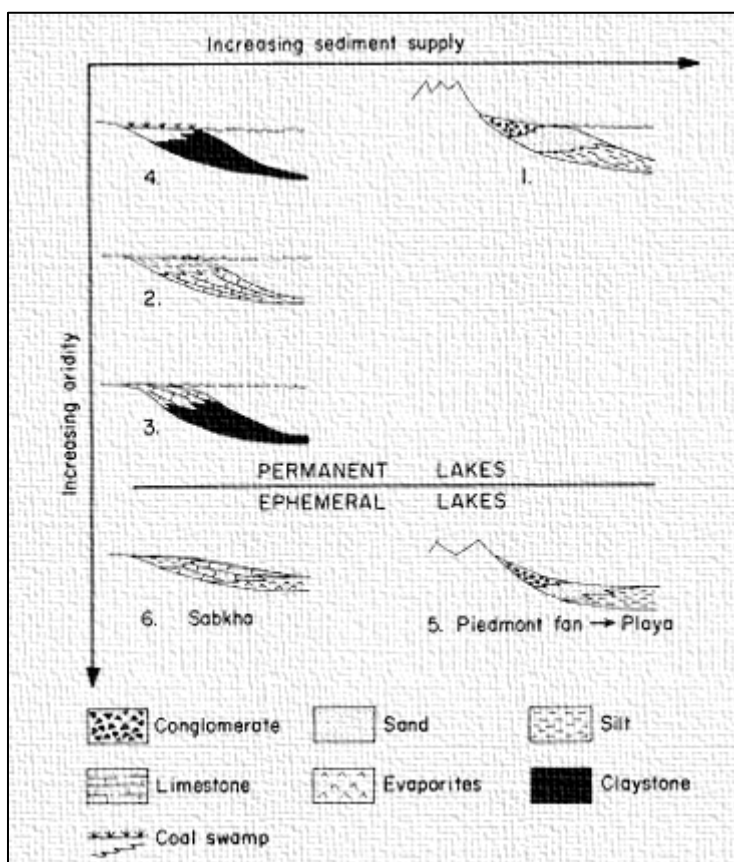
Gambar 6. Lingkungan pengendapan transisi (Boggs, 1995 dalam Wibowo, 2013)

4. Lingkungan Pengendapan Danau

Lingkungan pengendapan danau terbagi menjadi dua menurut Fisher (1965), Kukal (1971), Selley (1988) dalam Wibowo (2013) yaitu danau permanen yang terdiri dari 4 model dan danau ephermal yang terdiri dari 2 model .

- Danau permanen
 - Model 1 (Model pegunungan): terletak di daerah pegunungan, menerima endapan pasir dan sedimen halus dari delta sungai, ciri khasnya adalah varve, yaitu laminasi lempung teratur
 - Model 2 (Model dataran rendah): terletak di dataran rendah dengan sedikit suplai sedimen dari sungai, endapan karbonat dan cangkang moluska mendominasi daerah tepian sedangkan ganggang merah ditemukan di bagian dalam
 - Model 3 (Model sapropelit pusat): memiliki endapan organik (sapropelit) di bagian dalam dan dikelilingi oleh karbonat di zona dangkal, dengan ganggang dan moluska di tepian.
 - Model 4 (Model marsh-sapropelit): zona dangkal berupa rawa (marsh) yang bertransisi ke sapropelit di bagian Tengah
- Danau Ephermal: danau yang terbentuk dalam jangka waktu singkat , terbentuk di daerah gurun dengan iklim yang panas.
 - Model danau playa antar-gunung: berasal dari aliran sedimen kipas alluvial yang mengendap di dataran rendah setelah hujan

- Model danau sabkha-evaporit : air hujan mengisi cekungan sementara, kemudian menguap dan meninggalkan endapan garam dan mineral evaporit lainnya.



Gambar 7. Model lingkungan pengendapan danau (Selley, 1988 dalam Wibowo, 2013)

Sedimen yang terbentuk di lingkungan danau sangat dipengaruhi oleh faktor fisik, kimia, dan biologis yang terjadi di sekitar danau tersebut. Adapun karakteristik sedimen danau antara lain (Wibowo, 2013):

1. Komposisi dan jenis sedimen
 - a. Umunya terdiri dari lumpur (Clay), silts, dan kadag pasir halus, tergantung pada energi pengendapan dan sumber bahan sedimen.
 - b. Kandungan fosil dn jejak-jejak organisme sering ditemukan dalam sedimen danau, yang dapat membantu identifikasi paleoenvironment
2. Fasies sedimen
 - a. Sedimen danau sering menunjukkan fasies yang beragam, termasuk fasies lacustrine, yang memiliki ciri-ciri struktur laminasi halus, laminasi silts dan plastisitas dari endapan lumpur.
 - b. Fasies ini menunjukkan proses pengendapan yang lambat dan berlangsung secara stabil, biasanya dalam kondisi tenang dan minim arus besar.
3. Lapisan dan struktur

- a. Biasanya terbentuk lapisan-lapisan tipis yang saling bertumpuk, yang disebut laminasi, yang menunjukkan lamanya waktu pengendapan dan perubahan kondisi lingkungan.
- b. Adajuga lapisan yang mengalami lapisan silang, menunjukkan adanya arus atau turbulensi kecil selama pengendapan

Selain karakteristik di atas, ada beberapa faktor yang mempengaruhi sedimen danau antara lain(Wibowo, 2013):

1. Asal sedimen
 - a. Sedimen berasal dari pelapukan bahan di sekitar danau, termasuk tanah, batuan, dan bahan organik
 - b. Proses transportasi material sedimen terjadi melalui aliran sungai yang mengalir menuju danau, yang kemudian berkontribusi terhadap peningkatan jumlah sedimen yang terendapkan
2. Energi lingkungan
 - a. Kondisi tenang dan stabil di dasar danau mengakomodasi pengendapan bahan halus seperti clay dan silt
 - b. Perubahan iklim, misalnya musim panas ke musim dingin mempengaruhi tingkat sedimentasi.
3. Pengaruh iklim dan musiman
 - a. Variasi suhu dan curah hujan mempengaruhi jumlah bahan sedimen yang masuk ke danau
 - b. Dalam musim panas, air yang menghangat menyebabkan peningkatan aktivitas biologis dalam pelapukan, sehingga menghasilkan lebih banyak sedimen organik dan sedimen halus.
4. Interaksi biologis
 - a. Kehadiran organisme seperti plankton dan tumbuhan air mempengaruhi kualitas dan komposisi sedimen
 - b. Fosil dan jejak-jejak organisme yang ditemukan pada sedimen bisa menunjukkan kondisi lingkungan masa lalu, termasuk tingkat oksigen, keasaman, dan faktor kimia lainnya.
5. Faktor kimia
 - a. Kestabilan pH dan kondisi oksidasi-reduksi di lingkungan danau mempengaruhi pengendapan mineral tertentu, seperti karbonat dan bahan organik
 - b. Salinitas dan kandungan mineral lain di air danau turut menentukan jenis sedimen yang terbentuk.

2.5.4 Sedimen Anorganik

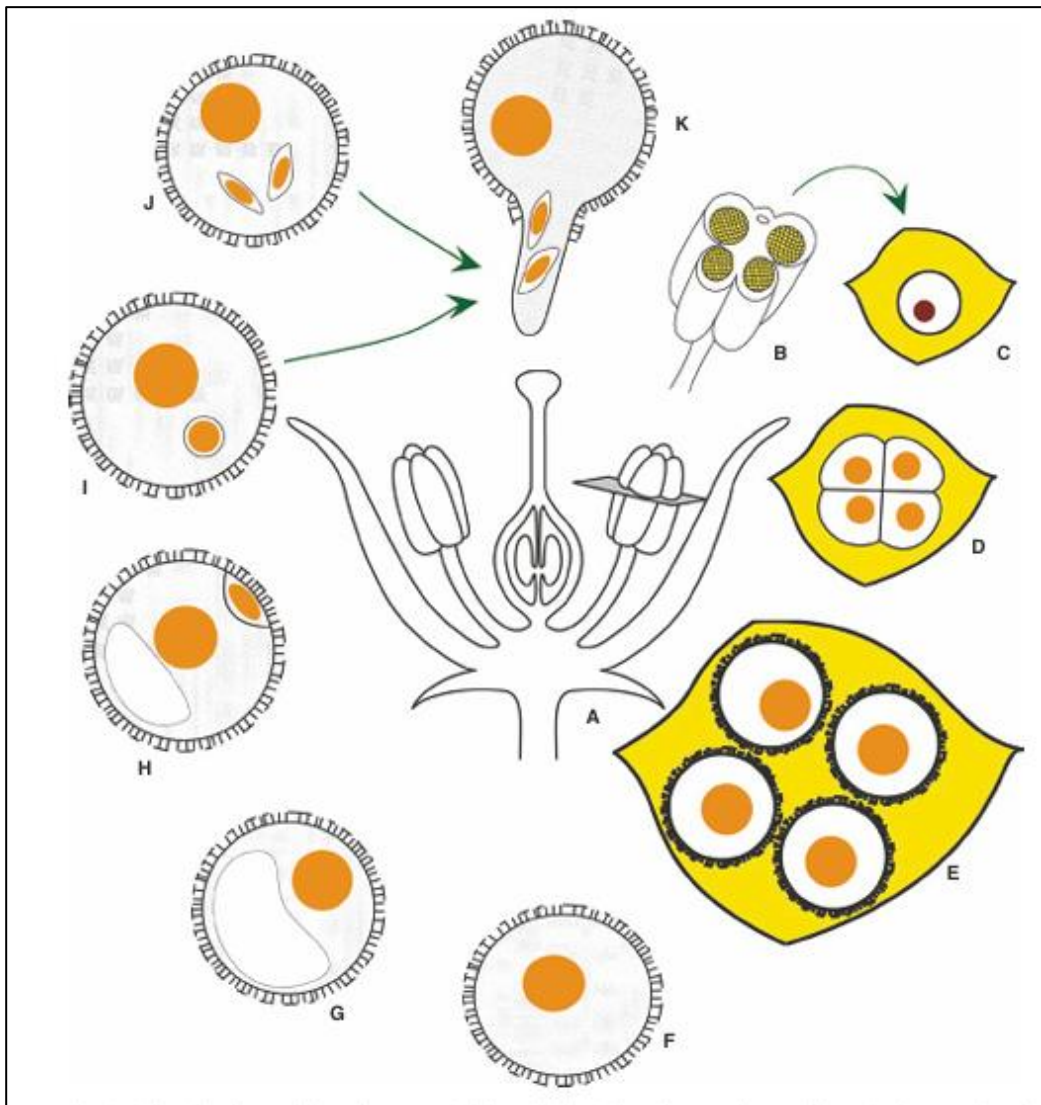
Sedimen anorganik adalah material yang terbentuk dari partikel mineral atau bahan non-organik yang terendapkan di dasar badan air seperti sungai, danau, atau laut. Sedimen ini berasal dari proses geologi seperti pelapukan batuan, erosi tanah, dan aktivitas vulkanik, atau aktivitas manusia seperti konstruksi dan pertanian. Sedimen anorganik biasanya terdiri dari pasir, lumpur, tanah liat, dan partikel mineral lainnya, seperti pasir kuarsa, lempung, dan mineral oksida seperti aluminium oksida (Cahill & Steele, 1986).

Karakteristik sedimen organik mencerminkan sifat fisik dan kimia dari partikel mineral penyusunnya. Komposisinya terdiri dari mineral seperti kuarsa, feldspar, oksida logam, dan mineral lempung, tanpa mengandung sisa-sisa organik seperti tumbuhan atau hewan. Sedimen anorganik tersusun terutama dari mineral, berbeda dengan sedimen organik yang mengandung sisa-sisa makhluk hidup. Ukuran partikelnya sangat bervariasi, mulai dari lempung, lanau, pasir, hingga kerikil, yang mempengaruhi tekstur, kemampuan menyerap air, serta penting untuk memahami lingkungan dan proses sedimentasi. Secara fisik, sedimen ini memiliki sifat seperti kekerasan, densitas, porositas, dan permeabilitas yang bergantung pada jenis mineral dan ukuran butirnya. Warna sedimen menjadi indikator penting yang mencerminkan komposisi mineral, seperti abu-abu, cokelat, atau merah akibat kandungan oksida besi. Secara kimia, sedimen anorganik cenderung stabil dan tidak mudah terurai, namun tetap dapat mempengaruhi pH serta sifat kimia lingkungan sekitarnya (Cahill & Steele, 1986).

Sedimen ini terbentuk melalui pelapukan mekanis dan pelapukan kimia, menghasilkan berbagai jenis batuan sedimen seperti batupasir dan serpih. Struktur perlapisan dalam sedimen, baik berdasarkan ukuran butir, komposisi mineral, maupun warna, memberikan informasi penting tentang kondisi lingkungan saat pengendapan. Transportasi sedimen ini dilakukan oleh gaya alam seperti air, angin, atau es yang mempengaruhi penyebaran dan penyortiran partikel. Banyak sedimen anorganik, terutama yang mengandung kuarsa memiliki ketahanan tinggi terhadap erosi, sehingga dapat bertahan dalam berbagai jenis lingkungan pengendapan (Lindholm, 1995).

2.5.5 Palynology

Palinologi merupakan cabang ilmu yang mempelajari mikrostruktur organik, khususnya polen dan spora, yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai kajian geologi maupun biologi. Secara umum, palinologi didefinisikan sebagai kajian yang berfokus pada karakteristik polen, baik dari segi bentuk, ukuran, ornamentasi dinding, maupun variasi morfologinya, yang memiliki peranan penting dalam interpretasi lingkungan dan umur batuan. Polen umumnya dihasilkan oleh tumbuhan tingkat tinggi (*Spermatophyta*), terutama tumbuhan berbunga, sedangkan spora lebih banyak ditemukan pada tumbuhan tingkat rendah yang bereproduksi tanpa biji. Kelompok tumbuhan penghasil spora ini mencakup tumbuhan paku (*Pteridophyta*), lumut, serta beberapa kelompok tumbuhan lain yang masih mempertahankan sistem reproduksi sederhana. Oleh karena itu, keberadaan polen dan spora dalam suatu sampel sedimen dapat memberikan informasi penting terkait komposisi vegetasi masa lampau, kondisi lingkungan pengendapan, hingga perubahan iklim purba (Harahap & Sofiyanti, 2019).



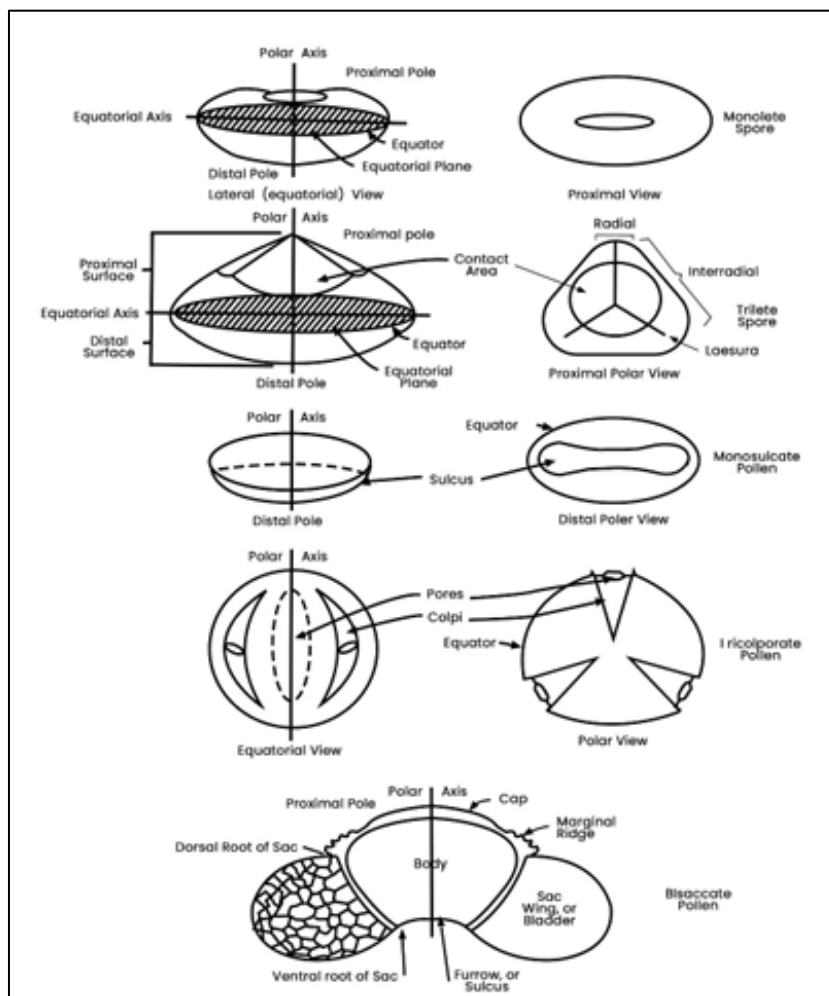
Gambar 8. Perkembangan polen pada angiosperma (tumbuhan berbunga). **A.** Ilustrasi skematik bunga angiosperma, **B.** Penampang melintang antera (kepala sari), **C.** Sel induk polen (pollen mother cell/PMC) yang terbungkus kalosa, dengan inti diploid berwarna merah tua, **D.** Tetrads yang terdiri atas empat mikrospora haploid yang masih terbungkus kalosa, dengan inti haploid berwarna oranye, **E.** Pembentukan dinding polen serta pemisahan mikrospora, **F.** Satu mikrospora bebas dengan inti haploid di bagian Tengah, **G.** Awal gametogenesis, ditandai dengan terbentuknya vakuola sentral (berwarna putih), **H.** Mitosis polen pertama, terbentuk sel generatif berbentuk lensa dengan inti generatif yang menempel pada dinding polen, **I.** Polen dua sel, sel generatif sudah terlepas dari dinding polen, **J.** Polen tiga sel setelah mitosis polen kedua, terlihat dua sel sperma beserta inti sperma, **K.** Perkecambahan dapat terjadi baik dari polen dua sel yang kemudian membentuk sel sperma, maupun dari polen tiga sel (jalur ditunjukkan oleh panah hijau) (Halbritter et al., 2018).

Keberadaan berbagai lempeng tektonik penyusun wilayah Indonesia memengaruhi persebaran dan karakter flora di tiap kepulauan sepanjang waktu geologi.

Daerah yang berasal dari Lempeng Asia umumnya ditumbuhi flora berciri Asia, sedangkan wilayah yang terbentuk dari Lempeng Australia didominasi tumbuhan yang berkerabat dengan flora Australia. Kondisi ini menyebabkan palinomorf yang dihasilkan juga bervariasi, sehingga zonasi polen antarwilayah dapat berbeda. Di Indonesia Timur, perbedaan ini terlihat jelas pada zonasi polen Tersier antara Sulawesi dan Papua. Zonasi polen Sulawesi cenderung mirip dengan Jawa, karena Sulawesi bagian barat merupakan bagian dari Sundaland, sedangkan Papua lebih dipengaruhi flora Australia karena berada pada Lempeng Australia (Lelono, 2007).

2.5.1 Morfologi Spora Polen

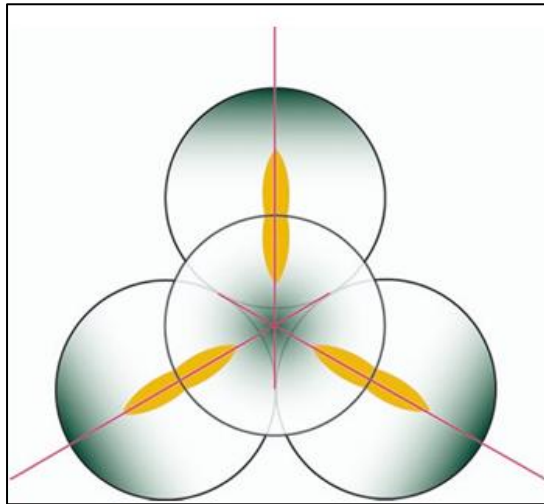
Secara umum, klasifikasi spora dan polen dilakukan berdasarkan ciri-ciri fisik atau morfologinya. Identifikasi dan determinasi spora maupun polen terutama mengacu pada beberapa karakter utama, yaitu tipe unit, keberadaan dan jenis aperture, ukuran serta bentuk, serta pola ornamentasi pada dinding luar (eksin)(Nugroho, 2014).



Gambar 9. Terminologi dan karakter dalam mendeskripsi polen dan spora (Nugroho, 2014)

a. Unit

Polen yang telah matang akan dilepaskan dalam bentuk unit penyebaran (*dispersal units*). Apabila hasil pasca-meiosis terpisah sempurna, maka unit penyebarannya berupa satu butir polen tunggal yang disebut monad. Namun, hasil pasca-meiosis juga dapat terpisah sebagian atau bahkan tetap menyatu secara permanen, sehingga membentuk dyad (kombinasi yang jarang), tetrad, atau polyad. Pollinaria merupakan unit penyebaran yang terdiri atas dua pollinia yang disertai dengan satu struktur penghubung steril sebagai apendiks (Halbritter et al., 2018).



Gambar 10. Tahap tetrad. Orientasi mikro spora/polen di dalam tetrad; kutub distal diberi arsiran hijau.

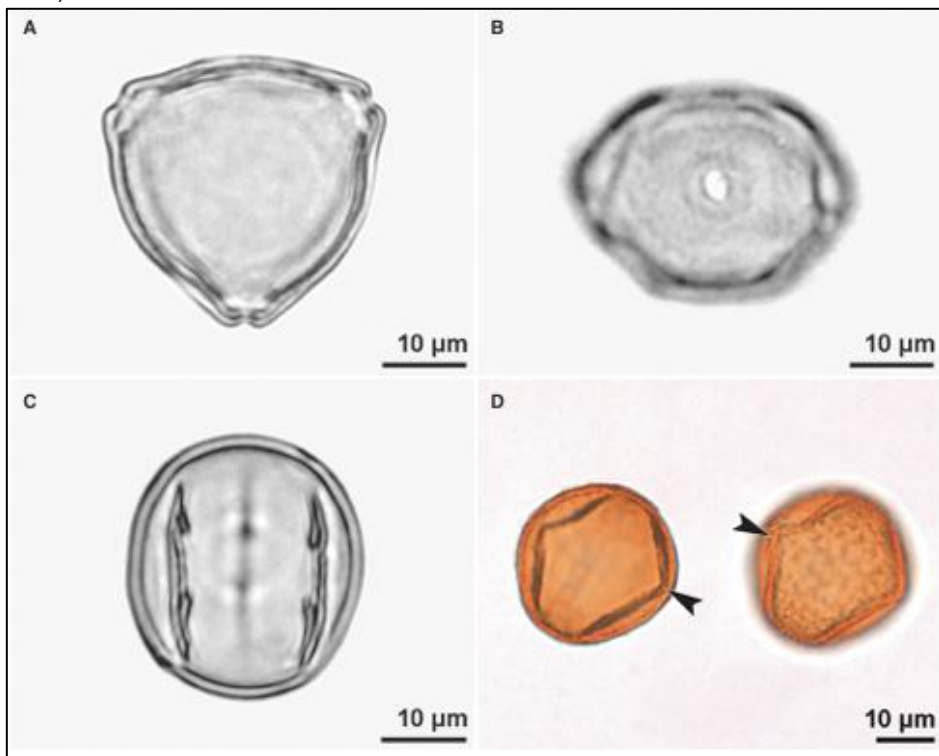
b. *Aperture*

Aperture adalah suatu bagian pada dinding polen yang berbeda secara signifikan dari bagian sekitarnya, baik dari segi morfologi dan/atau anatomi. *Aperture* diperkirakan berfungsi sebagai tempat terjadinya perkecambahan (germinasi) dan berperan dalam *harmomegathy* (kemampuan polen menyesuaikan bentuk/volume akibat perubahan kadar air). Butir polen yang tidak memiliki *aperture* disebut *inaperturate* (Furness 2007). Definisi *aperture* ini berlaku baik untuk polen *angiospermae* maupun *gymnospermae*, namun pada *gymnospermae* tipe *aperture* (misalnya leptoma atau daerah germinasi) umumnya berbeda dari yang terdapat pada *angiospermae* (Halbritter et al., 2018).

Polaritas butir polen menentukan istilah yang digunakan untuk *aperture*. *Aperture* berbentuk melingkar disebut *porus* apabila terletak pada bagian ekuatorial atau global; jika terletak pada bagian distal, maka disebut *ulcus*. *Aperture* berbentuk memanjang disebut *colpus* apabila terletak pada bagian ekuatorial atau global; jika terletak pada bagian distal, maka disebut *sulcus*. Kombinasi antara *porus* dan *colpus* disebut *colporus*; sedangkan *colpori* terletak pada bagian ekuatorial atau global (Halbritter et al., 2018).

Pada polen heteroaperturate, terdapat dua tipe *aperture* yang berbeda (tunggal dan/atau gabungan) dalam satu butir polen, yaitu berupa kombinasi colpi

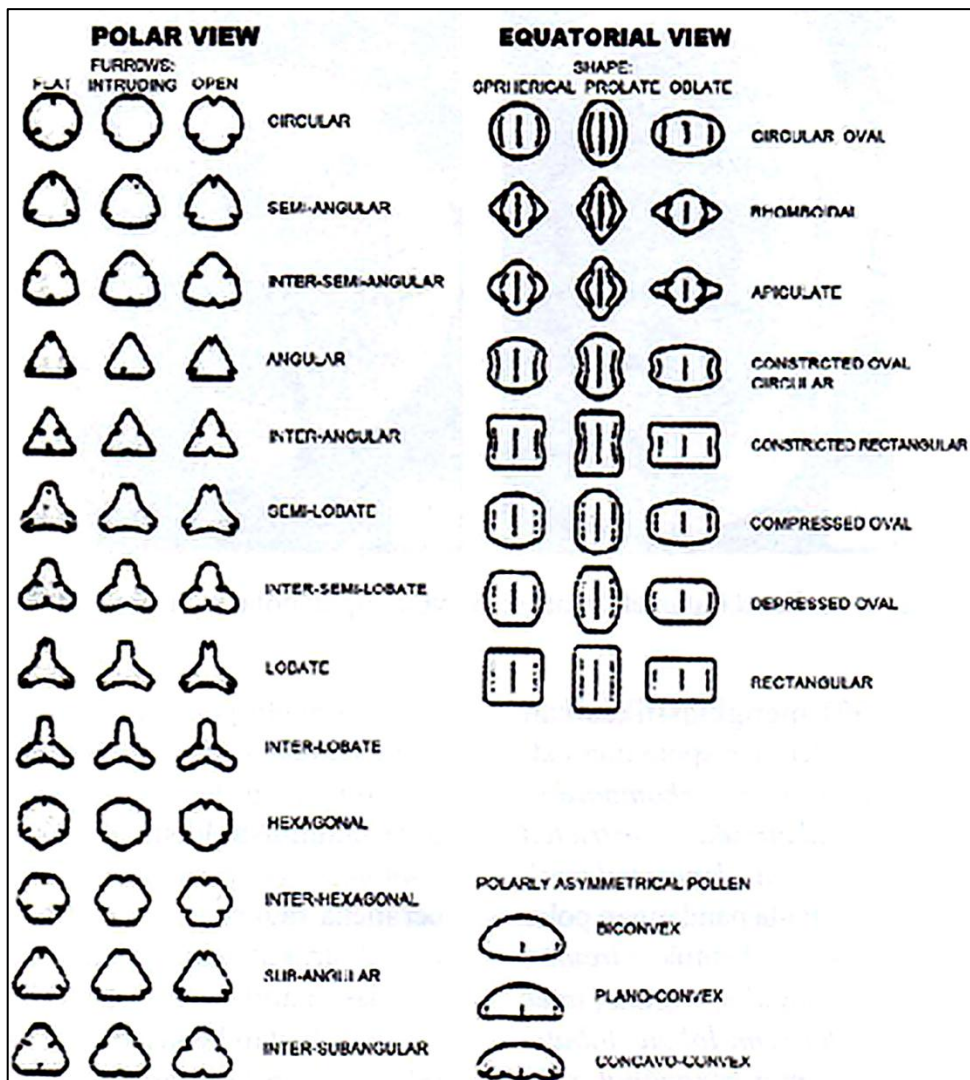
dengan colpori atau pori. Aperture berbentuk melingkar atau elips dengan batas yang tidak jelas disebut poroid. Kombinasi tambahan yang jarang antara ektoaperture dan endoaperture, yang umumnya diamati menggunakan LM (Light Microscope/mikroskop cahaya), mencakup tipe pororate dan colporoidate (Gambar 9). Butir polen yang memiliki aperture majemuk yang tersusun atas ektopori berbentuk melingkar dan endopori disebut pororate. Aperture majemuk yang tersusun atas sebuah colpus (ektoaperture) dengan endoaperture yang tidak jelas disebut colporoidate. Apabila colpus memiliki tonjolan yang jelas pada bagian ekuatorial butir polen, maka struktur tersebut disebut geniculum (Halbritter et al., 2018).



Gambar 11. Ciri-ciri khusus aperture yang diamati menggunakan LM (mikroskop cahaya).A–B. *Corylus* sp., Betulaceae, fosil, Kwartar, Austria, polen tipe pororate pada tampilan polar dan ekuatorial.C. *Eucommia* sp., Eucommiaceae, fosil, Miosen Tengah, Austria, polen tipe colporoidate pada tampilan ekuatorial.D. *Quercus petraea*, agaceae, polen dengan geniculum (kepala panah), penampang optik (kiri) dan fokus bagian atas (kanan).

c. Ukuran dan bentuk Polen

Morley (1990) membagi bentuk polen dan spora berdasarkan pandangan ekuatorial menjadi 8 tipe, yaitu circular/oval, rhomboidal, apiculate, constricted oval circular, constricted rectangular, compressed oval, depressed oval, dan rectangular. Sedangkan berdasarkan pandangan polar, bentuknya dibedakan menjadi 13 tipe, seperti circular, semi-angular, angular, lobate, hexagonal, sub-angular, serta variasi bentuk antaranya (Nugroho, 2014).

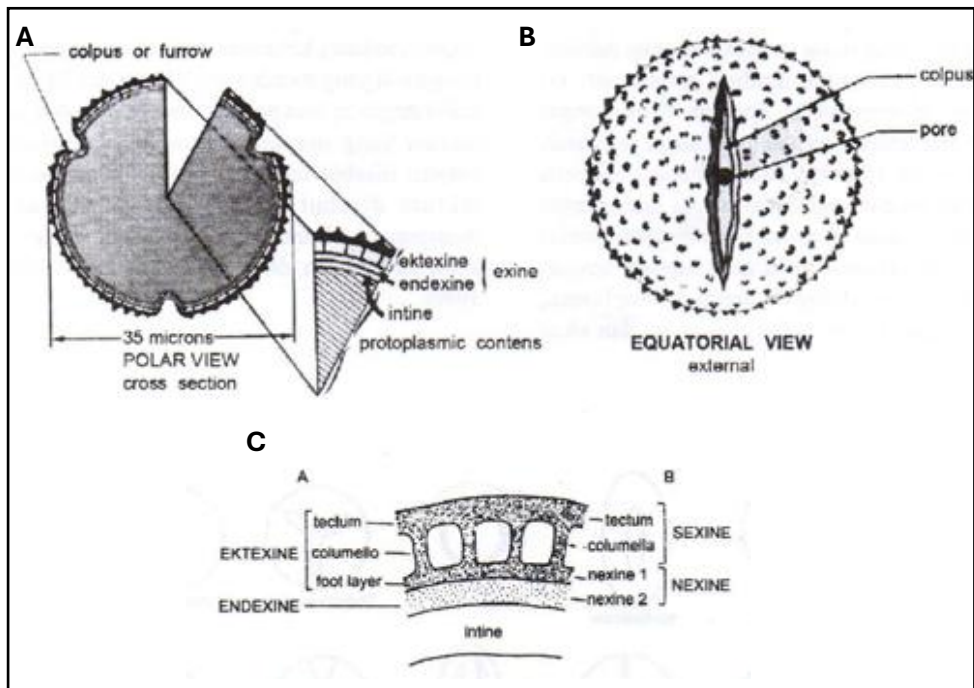


Gambar 12. Bentuk pol en dan spora (Morley, 1990) dalam (Nugroho, 2014)

d. Pola ornamentasi dinding luar (Eksin)

Dinding polen memiliki struktur kompleks sebagai bentuk adaptasi terhadap lingkungan. Penyusun utama dinding polen adalah sporopolenin, yaitu senyawa yang sangat stabil dan tahan terhadap pengaruh lingkungan. Secara umum dinding polen dan spora terdiri dari dua lapisan utama, yaitu *intine* dan *exine*. *Intine* berada di bagian dalam, tersusun dari selulosa, dan mudah hilang setelah polen mati. Sementara itu, *exine* merupakan lapisan luar yang sangat resisten terhadap tekanan, suhu, kondisi asam, oksidasi, serta proses fosilisasi (Nugroho, 2014).

Exine terdiri dari *endexine* dan *ektexine*. *Ektexine* tersusun atas tektum, kolumela/bakula, dan lapisan kaki. Berdasarkan keberadaan tektum, polen dibedakan menjadi tektat (tektum menutupi seluruh permukaan), inteaktat (tanpa tektum), dan semitektat (tektum hanya menutupi sebagian permukaan) (Morley, 1990) dalam (Nugroho, 2014).



Gambar 13. A,B Skema susunan dinding polen **C.** Morfologi eksin dinding polen (Morley, 1990) dalam(Nugroho, 2014)

2.5.2 Biozonasi

Penelitian zonasi polen di Pulau Jawa dilakukan dengan melibatkan fosil pembanding lain yang telah memiliki kisaran umur yang lebih pasti, seperti foraminifera dan nanoplankton. Dengan adanya fosil pembanding tersebut, rentang stratigrafi dari polen indeks dapat ditentukan secara lebih akurat melalui korelasi dengan fosil indeks foraminifera dan nanoplankton(Lelono, 2007).

Kajian palinologi terhadap batuan sedimen berumur Eosen hingga Pliosen di Pulau Jawa menghasilkan tujuh zonasi polen yang tersusun dari umur tertua hingga termuda sebagai berikut (Lelono, 2007):

a. Zona Proxapertites operculatus

Zona ini dicirikan oleh keberadaan polen Proxapertites operculatus. Zona tersebut memiliki kesetaraan dengan zona foraminifera planktonik P14–P17, yang menunjukkan umur Eosen.

b. Zona Meyeripollis naharkotensis

Zona ini ditandai oleh kisaran kemunculan polen Meyeripollis naharkotensis. Zona ini berkorelasi dengan zona foraminifera planktonik P18–N2, sehingga merepresentasikan umur Oligosen.

c. Zona Florschuetzia trilobata

Batas bawah zona ini ditentukan oleh kemunculan terakhir Meyeripollis naharkotensis, sedangkan batas atasnya dicirikan oleh kemunculan awal Florschuetzia levipoli. Zona ini sebanding dengan zona foraminifera planktonik N3–N5, yang menunjukkan umur Oligosen Akhir bagian atas hingga Miosen Awal bagian bawah.

d. Zona *Florschuetzia levipoli*

Zona ini dimulai dengan kemunculan awal *Florschuetzia levipoli* dan berakhir pada kemunculan awal *Florschuetzia meridionalis*. Zona ini berkorelasi dengan zona foraminifera planktonik N6–N8, sehingga mengindikasikan umur Miosen Awal bagian atas.

e. Zona *Florschuetzia meridionalis*

Batas bawah zona ini ditandai oleh kemunculan awal *Florschuetzia meridionalis*, sedangkan batas atasnya dibatasi oleh kemunculan *Florschuetzia trilobata*. Zona ini disetarakan dengan zona foraminifera planktonik N9–N16, yang mencerminkan umur Miosen Tengah hingga Miosen Akhir bagian bawah.

f. Zona *Stenochlaenidites papuanus*

Zona ini dibatasi pada bagian bawah oleh kemunculan terakhir *Florschuetzia trilobata* dan pada bagian atas oleh kemunculan awal *Dacrycarpidites australiensis*. Selain itu, zona ini juga dicirikan oleh keberadaan spora *Stenochlaenidites papuanus*. Zona ini sebanding dengan zona foraminifera planktonik N17–N19, yang menunjukkan umur Miosen Akhir bagian atas hingga Pliosen Awal bagian bawah.

g. Zona *Dacrycarpidites australiensis*

Zona ini dimulai dengan kemunculan awal polen *Dacrycarpidites australiensis* dan berakhir dengan kemunculan terakhir spora *Stenochlaenidites papuanus*. Zona ini berkorelasi dengan zona foraminifera planktonik N20–N21, yang mengindikasikan umur Pliosen Akhir.

A G E		DIAGNOSTIC SPECIES							POLLEN ZONE OF JAVA ISLAND	ZONAL MARKER	CHARACTERISTIC OF ZONE
		<i>Monoporites annulatus</i>	<i>Dacrycarpidites australiensis</i>	<i>Stenochlaenidites papuanus</i>	<i>Florschuetzia meridionalis</i>	<i>Florschuetzia levipoli</i>	<i>Florschuetzia trilobata</i>	<i>Meyeripollis naharkotensis</i>			
PLEISTOCENE	N 23								<i>Monoporites annulatus</i>		Abundant <i>M. annulatus</i> which associates with <i>D. australiensis</i> , in the absence of <i>S. papuanus</i> .
	N 22										
PLIOCENE	N 21								<i>Dacrycarpidites australiensis</i>	<i>S. papuanus</i> <i>D. australiensis</i>	The presence of <i>D. australiensis</i> together with <i>S. papuanus</i> .
	N 20										
MIOCENE	EARLY								<i>Stenochlaenidites papuanus</i>		The occurrence of <i>S. papuanus</i> without <i>D. australiensis</i> and <i>F. trilobata</i> .
	N 19										
	N 18								<i>F. trilobata</i>		
	N 17										
	LATE								<i>Florschuetzia meridionalis</i>		<i>F. meridionalis</i> , <i>F. levipoli</i> and <i>F. trilobata</i> are found together within this zone.
	N 16										
	N 15										
	N 14										
	MIDDLE								<i>Florschuetzia levipoli</i>		The appearance of <i>F. levipoli</i> in association with <i>F. trilobata</i> . <i>F. meridionalis</i> is absent from this zone.
	N 13										
	N 12								<i>Florschuetzia trilobata</i>		The presence of <i>F. trilobata</i> without <i>F. levipoli</i> and other Paleogene taxa.
	N 11										
Oligocene	EARLY								<i>Meyeripollis naharkotensis</i>	<i>M. naharkotensis</i>	The occurrence of <i>M. naharkotensis</i> .
	N 10										
Eocene	LATE								<i>Proxapertites operculatus</i>		The existence of <i>P. operculatus</i> .
	N 9										

Gambar 14. Zonasi Palinologi menurut Rahardjo dkk (1994) dalam (Lelono, 2007)