

BAB 2

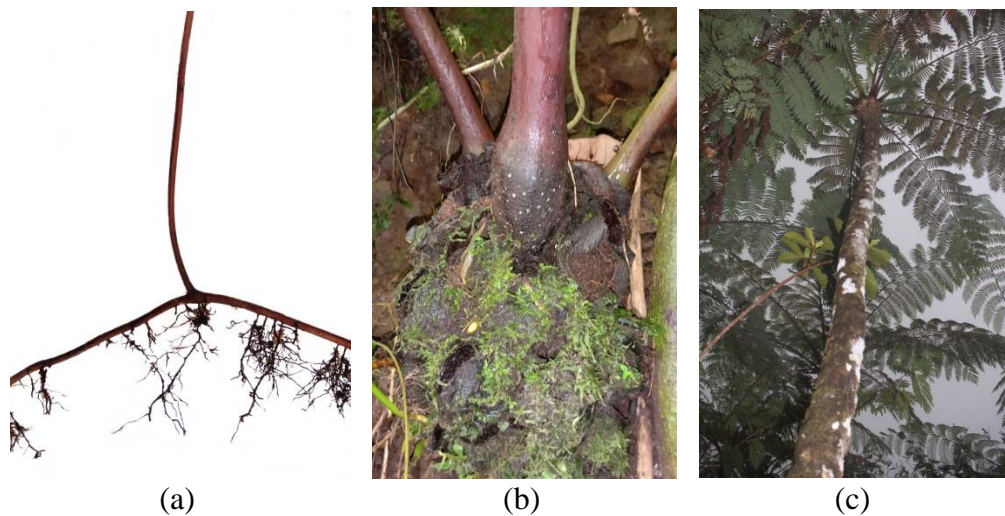
TINJAUAN TEORETIS

2.1 Kajian Pustaka

2.1.1 Tinjauan Umum Tumbuhan Paku

Tumbuhan paku termasuk ke dalam salah satu anggota kelompok Phylum Tracheophyta yang pada bagian-bagian tubuhnya memiliki sistem pembuluh yang sudah jelas (Ruggiero *et al.*, 2015; Nurcahyati, 2010). Tumbuhan ini merupakan tumbuhan yang memiliki karakteristik transisi atau peralihan antara tumbuhan bertalus dengan tumbuhan berkormus. Dari segi morfologinya, anggota tumbuhan paku telah jelas memiliki kormus, sehingga secara nyata dapat dibedakan bagian antara akar, batang dan daun (Agrawal *et al.*, 2017; Janna *et al.*, 2020; Kaulika & Nurza, 2021; Tjitrosoepomo, 2014: 206) sebagai berikut:

- 1) Akar pada tumbuhan paku memiliki bentuk dan ukuran yang bervariasi, dapat berupa *rhizoid* (akar halus) hingga akar yang sebenarnya. Akar pada tumbuhan paku ini biasanya tumbuh dari batang tumbuhan paku yang dikenal sebagai rimpang (*rhizome*). Rimpang ini dapat berupa rimpang menjalar (*creeping*) yang tersebar/merayap di tanah atau bahkan memanjat pada batang pohon atau cabang (**Gambar 2.1a**), rimpang tegak (*caudex/root-stock*) (**Gambar 2.1b**), dan berupa batang yang besar (*trunk*) (**Gambar 2.1c**) (Johns dalam A. Hidayat, 2011; see also Agrawal *et al.*, 2017). Rimpang (*rhizome*) pada umumnya ditutupi dan dilindungi oleh sisik atau rambut. Struktur tersebut berfungsi untuk melindungi dari kerusakan dan memperkuat rimpang, karena pada umumnya rimpang tidak mengalami penambahan diameter (de Winter & Amoroso, 2003: 29).

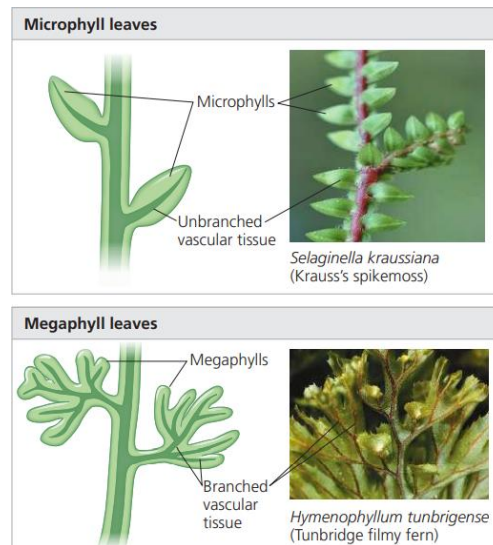


Gambar 2.1 Tipe *Rhizome*

(a) *creeping*; (b) *caudex*; (c) *trunk*

Sumber: Dokumentasi Pribadi (2022)

- 2) Daun (*frond*) merupakan bagian yang paling khas pada tumbuhan paku. Beberapa tumbuhan paku, ada yang memiliki daun berukuran kecil seperti sisik, berupa helaian dan hanya dilengkapi dengan satu pertulangan saja yang dinamakan dengan mikrofil, serta ada juga yang memiliki daun berukuran besar, bertangkai dan memiliki banyak pertulangan daun yang dinamakan dengan makrofil/megafil sebagaimana yang tercantum pada **Gambar 2.2** (Tjitrosoepomo, 2014: 219, 236 & 245; Urry *et al.*, 2020: 631). Daun tumbuhan paku ada yang memiliki sporangium yang dinamakan dengan daun fertil (sporofil), serta ada yang tidak memiliki sporangium dinamakan dengan daun steril (tropofil) yang berfungsi untuk asimilasi (Tjitrosoepomo, 2014: 209-210). Berdasarkan hal tersebut, sporofil dan tropofil pada tumbuhan paku biasanya memiliki ukuran dan bentuk yang sama (monomorfik), namun pada beberapa tumbuhan paku memiliki sprofil dan tropifil dengan bentuk dan ukuran yang berbeda (dimorfik) sebagaimana tercantum pada **Gambar 2.3** (Simpson, 2010: 100).



Gambar 2.2 Perbedaan Daun Mikrofil dengan Daun Makrofil/Megafil
 Sumber: (Urry *et al.*, 2020: 631)



(a) (b)

Gambar 2.3 Tipe Frond

(a) Monomorfik; (b) Dimorfik

Sumber: (Knapp, 2011: 20 & 24)

Ditinjau dari segi habitus dan cara hidupnya, tumbuhan paku sangat heterogen. Terdapat jenis tumbuhan paku yang ukurannya kecil dengan struktur yang masih sederhana, serta ada pula tumbuhan paku yang berukuran besar dengan ukuran daun yang mencapai 2 meter atau lebih (Tjitrosoepomo, 2014: 206). Sedangkan berdasarkan cara hidupnya, tumbuhan paku ada yang hidup di air (hidrofit), di tempat lembab (higrofit), menempel pada tumbuhan lain (epifit), permukaan tanah (terrestrial), dan permukaan batu (Hutasuhut & Febriani, 2019; see also Adlini *et al.*, 2021). Tumbuhan paku dapat tersebar hampir di seluruh bagian dunia, kecuali daerah yang bersalju abadi dan daerah gurun (Nugroho *et al.*, 2018). Namun, pola persebaran dari tumbuhan paku ini dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti suhu udara, intensitas cahaya, kelembaban udara dan tanah (Laely *et al.*, 2020).

2.1.1.1 Reproduksi dan Siklus Hidup Tumbuhan Paku

2.1.1.1.1 Spora sebagai Alat Reproduksi Tumbuhan Paku

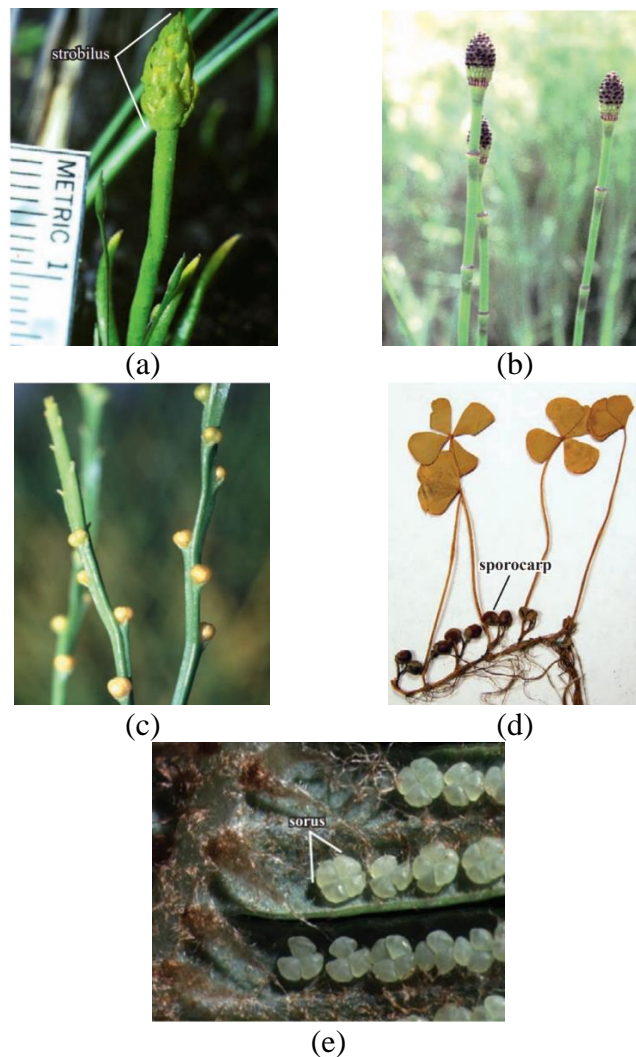
Meskipun tumbuhan paku telah memiliki sistem pembuluh, tetapi masih belum menghasilkan biji dan alat perkembangbiakkan lainnya seperti halnya tumbuhan berbiji pada umumnya, melainkan menghasilkan spora sebagai alat perkembangbiakkan utamanya (Amin & Jumisah, 2019). Spora dibentuk di dalam suatu selubung kotak spora yang dinamakan dengan sporangium (jamak: sporangia) (Mardiyah *et al.*, 2016). Sporangium pada tumbuhan paku dapat dibedakan menjadi dua tipe, yaitu eusporangia dan leptosporangia (**Gambar 2.4**). Eusporangia memiliki ukuran yang relatif besar dan berasal dari beberapa sel epidermis, membentuk dinding sporangium yang terdiri dari beberapa lapisan sel, serta menghasilkan spora yang sangat banyak. Sedangkan leptosporangia berasal dari suatu lapis sel epidermis serta membentuk dinding sporangium yang terdiri dari satu lapis sel. Leptosporangia memiliki spora yang cenderung lebih sedikit (Simpson, 2010: 96 & 103).



Gambar 2.4 Tipe-tipe Sporangia
(a) Eusporangia; (b) Leptosporangia
Sumber: (Simpson, 2010: 96 & 104)

Pada tumbuhan paku letak sporangia berbeda-beda. Sporangia pada tumbuhan paku yang termasuk ke dalam kelas Lycopodiopsida dan sub kelas Equisetidae umumnya terletak pada suatu sistem tunas terminal yang dikenal sebagai strobilus (**Gambar 2.5a-b**). Selain itu, ada tumbuhan paku yang termasuk ke dalam Psilotales memiliki sporangia terdiri dari 2–3 lobus dan terletak pada ketiak daun pelindung yang disebut synangium (**Gambar 2.5c**). Pada kelas *Marsileaceae* memiliki suatu struktur yang dinamakan sporokarpium (**Gambar**

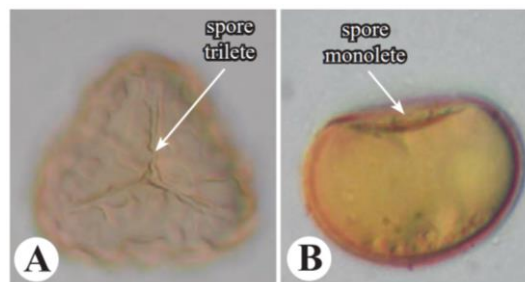
2.5d) dengan tangkai muncul dari pangkal tangkai daun atau pada ketiak daun. Sporokarpium terdiri dari dua bagian, masing-masing terdiri dari beberapa baris sori internal. Sori berisi kolom megasporangia dan mikrosporangia yang tidak memiliki annulus serta dilindungi oleh indusium berupa tudung (Simpson, 2010: 85, 94, 98, 113, & 114). Sedangkan pada kebanyakan tumbuhan paku lainnya, sporangia tumbuh secara berkelompok dalam suatu bentuk yang dikenal sebagai sorus, kumpulan dari sorus inilah dinamakan dengan sori (**Gambar 2.5e**) (Mardiyah *et al.*, 2016). Sori ini ada yang seperti bercak berwarna coklat, hitam ataupun jingga yang dapat ditemukan di permukaan bawah daun tumbuhan paku (Attwood dalam Agrawal *et al.*, 2017).



Gambar 2.5 Variasi Letak Sporangia
 (a) dan (b) Strobilus; (c) Synangium; (d) Sporokarp; (e) Sorus
 Sumber: (Simpson, 2010: 84 ,95, 97, 111, & 114)

Spora pada tumbuhan paku memiliki struktur yang terdiri dari perispora (perin), eksospora (eksin) dan endospora (intin). Perin merupakan lapisan luar eksospora yang berasal dari tapetum dan dapat membentuk sebagian besar sporoderm. Eksin merupakan lapisan yang berasal dari sel tetraspora dan sebagian besar berasal dari tapetum. Sedangkan intin merupakan lapisan pektoselulosa yang terbentuk di antara eksin dengan membran sitoplasma (Tryon & Lugardon, 1991: 12).

Pada bagian eksin (eksospora) memiliki suatu area germinasi berupa struktur tipis dengan fungsi sebagai pengatur mekanisme perubahan volume cairan sel, yang dinamakan aperture. Aperture pada spora tumbuhan paku dapat dibedakan menjadi *trilete*, *monolete* dan *alete* (**Gambar 2.6**). *Trilete* merupakan bekas luka saat induk spora pecah (laesura) dan terpisah menjadi empat sel reproduktif, berupa tiga garis yang berhubungan dalam satu titik. *Monolete* merupakan bekas luka saat induk spora pecah (laesura) dan terpisah menjadi empat sel reproduktif di sekitar axis vertikal berupa garis tunggal. Sedangkan, *alete* tidak ditemukan adanya laesura (Kapp, Susandarini dalam Pranita *et al.*, 2017); (Simpson, 2010: 81).



Gambar 2.6 Tipe Apertura pada Spora
(A) *Trilete*; (B) *Monolete*

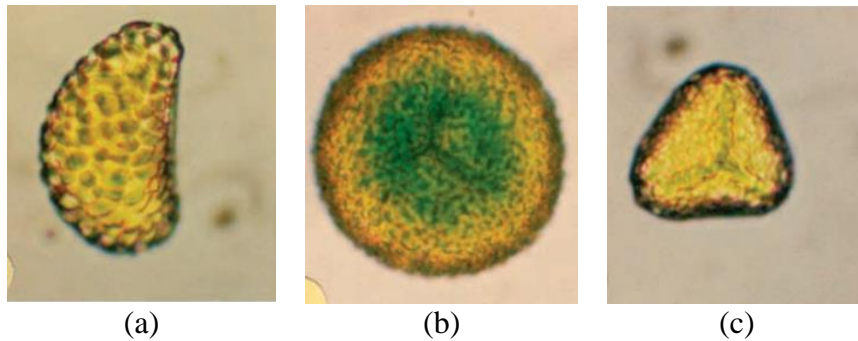
Sumber: (Simpson, 2010: 81)

Selain itu, pada bagian eksin terdapat berbagai variasi struktur permukaan yang dinamakan ornamentasi. Kapp (dalam Pranita *et al.*, 2017) membagi variasi ornamentasi menjadi beberapa macam, yaitu sebagai berikut:

- 1) *Psilate* yaitu ornamentasi eksin dengan struktur permukaan halus, rata dan licin.
- 2) *Perforate* yaitu ornamentasi eksin dengan struktur permukaan berlubang yang berukuran kurang dari 1 μm .

- 3) *Foveolate* yaitu ornamentasi eksin dengan struktur permukaan berlubang yang berukuran mencapai lebih dari 1 μm .
- 4) *Scabrate* yaitu ornamentasi eksin berbentuk isodiametrik dengan ukuran tidak lebih dari 1 μm .
- 5) *Verrucate* yaitu ornamentasi eksin berbentuk isodiametrik dengan ukuran lebih dari 1 μm .
- 6) *Gemmate* yaitu ornamentasi eksin berbentuk seperti tonjolan (isodiametrik) berkerut dengan ukuran lebih besar dari 1 μm .
- 7) *Clavate* yaitu ornamentasi eksin berbentuk seperti gada, dengan ukuran tinggi lebih besar dari pada lebarnya.
- 8) *Echinate* yaitu ornamentasi eksin yang berbentuk seperti duri.
- 9) *Rugulate* yaitu ornamentasi eksin berliku dan memanjang secara horizontal membentuk pola yang tidak beraturan.
- 10) *Striate* yaitu ornamentasi eksin berliku dan memanjang secara horizontal dengan susunan sejajar antara satu dengan yang lainnya.
- 11) *Reticulate* yaitu ornamentasi eksin yang membentuk pola seperti jala.

Spora pada tumbuhan paku juga memiliki berbagai macam variasi bentuk, namun sebagian besar memiliki bentuk elipsoid, sferoidal (globose) dan tetrahedral yang ditunjukkan pada **Gambar 2.7** (Tryon & Lugardon, 1991: 1). Bentuk spora tersebut memiliki ukuran yang berbeda-beda, sehingga dapat dikategorikan menjadi 6 kategori ukuran, yaitu spora dengan ukuran $< 10 \mu\text{m}$ tergolong kategori sangat kecil, spora dengan ukuran $10\text{--}25 \mu\text{m}$ tergolong kategori kecil, spora dengan ukuran $25\text{--}50 \mu\text{m}$ tergolong kategori sedang, spora dengan ukuran $50\text{--}100 \mu\text{m}$ tergolong kategori besar, spora dengan ukuran $100\text{--}200 \mu\text{m}$ tergolong kategori sangat besar, dan spora dengan ukuran $> 200 \mu\text{m}$ tergolong kategori raksasa (Pranita *et al.*, 2017).



Gambar 2.7 Variasi Bentuk Spora

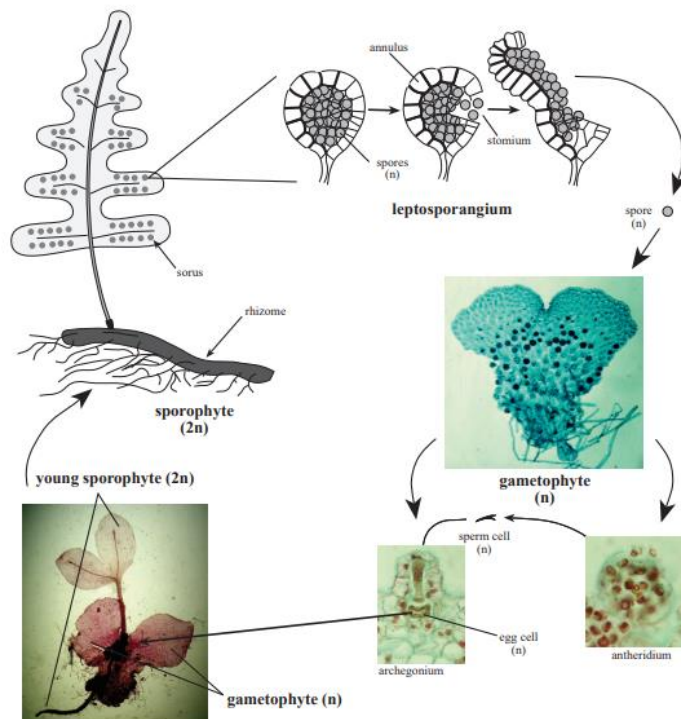
(a) Ellipsoidal; (b) Spheroidal/globose; (c) Tetrahedral

Sumber: (Zenkteler, 2012)

Tumbuhan paku berdasarkan sifat sporanya, ada yang bersifat homospor (isospor), heterospor dan peralihan. Paku homospor (berumah satu) menghasilkan satu jenis spora dengan bentuk dan ukuran yang sama. Paku heterospor (berumah dua) menghasilkan dua jenis spora yang berbeda dan bentuk serta ukurannya tidak sama. Sedangkan paku peralihan menghasilkan spora yang ukurannya sama tetapi jenisnya berbeda (Tjitrosoepomo, 2014: 211-213).

2.1.1.1.2 Siklus Hidup Tumbuhan Paku

Tumbuhan paku selama siklus hidupnya mengalami pergiliran keturunan (metagenesis) yang terdiri dari fase gametofit dan fase sporofit. Pada fase gametofit, spora yang dilepaskan oleh sporangium yang mendarat di lingkungan yang cocok akan tumbuh menjadi protalium. Pada protalium berkembang anteridium (jantan) untuk memproduksi sel sperma dan arkegonium (betina) untuk memproduksi sel telur. Fertilisasi terjadi ketika sel sperma berenang menggunakan flagelnya menuju sel telur dengan bantuan sekret yang dikeluarkan oleh arkegonium dan kemudian membentuk zigot. Zigot berkembang menjadi sporofit yang sementara mendapatkan nutrisi dari protalium melalui haustorium hingga protalium tersebut mati. Pada fase sporofit spora direproduksi kembali dibagian permukaan bawah daun. Fase sporofit ini merupakan fase yang dominan pada siklus hidup tumbuhan paku (**Gambar 2.8**) (Urry *et al.*, 2020: 629-630; Tjitrosoepomo, 2014: 252-255).



Gambar 2.8 Siklus Hidup Tumbuhan Paku

Sumber: (Simpson, 2010: 106)

2.1.1.2 Klasifikasi Tumbuhan Paku

Menurut Ruggiero *et al.* (2015) tumbuhan paku dapat diklasifikasikan menjadi dua kelas diantaranya merupakan tumbuhan paku, yaitu kelas Lycopodiopsida dan kelas Polypodiopsida.

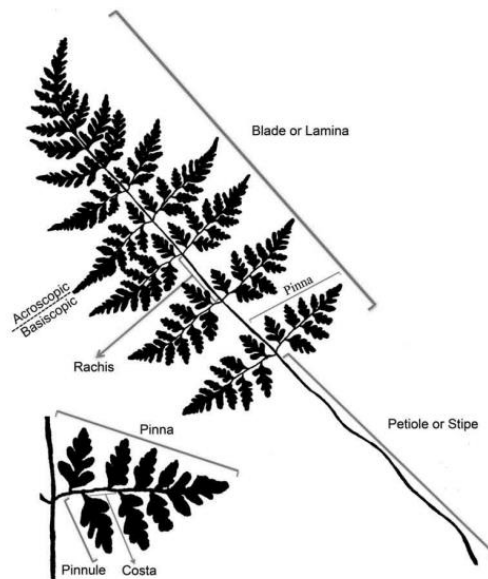
- 1) Kelas Lycopodiopsida, memiliki karakteristik batang dan akar yang bercabang menggarpu, daun kecil-kecil (mikrofil), tersusun rapat, bertulang daun satu, dan pada beberapa ordo daunnya mempunyai struktur seperti lidah (ligula). Daun-daun yang banyak tersusun secara rapat menurut garis spiral, kemudian sprofil biasanya terkumpul dalam suatu rangkaian sporofil berbentuk bulir yang terletak pada ujung batang (Tjitrosoepomo, 2014: 219). Kelas ini dibedakan menjadi tiga ordo, yaitu Isoetales, Lycopodiales dan Selaginellales (Ruggiero *et al.*, 2015).
- 2) Kelas Polypodiopsida, tumbuhan paku ini dikenal sebagai paku sebenarnya karena dari segi morfologinya beberapa anggota kelompok spesiesnya memiliki daun yang besar, bertangkai, mempunyai pertulangan daun yang banyak, serta pada saat muda daunnya menggulung (Tjitrosoepomo, 2014:

245-246). Kelas ini dibedakan menjadi empat sub kelas, yaitu Equisetidae, Marattidae, Ophioglossidae (Psilotidae), dan Polypodiidae (Ruggiero *et al.*, 2015).

Berdasarkan beberapa pernyataan para ahli tersebut, penulis menyimpulkan bahwa tumbuhan paku merupakan salah satu tumbuhan tingkat rendah yang secara morfologinya memiliki peralihan karakteristik antara tumbuhan bertalus dan tumbuhan berkormus, diantaranya bagian tubuh tumbuhan paku yang sudah dapat dibedakan, memiliki sistem pembuluh pada bagian tubuhnya, namun alat perkembangbiakannya menggunakan spora. Dalam studi taksonomi, tumbuhan paku dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelas salah satunya berdasarkan perbedaan karakteristik morfologinya.

2.1.2 Tinjauan Umum Polypodiopsida

Polypodiopsida merupakan salah satu kelas dari tumbuhan paku yang dikenal sebagai tumbuhan paku sejati karena sebagian besar memiliki daun yang sempurna. Kelas ini merupakan kelompok tumbuhan paku yang mendominasi dan memiliki anggota spesies paling banyak. Ciri khas dari kelas Polypodiopsida ini yaitu daunnya besar, menyirip, sorus terletak pada bagian permukaan bawah daun, serta ketika masih muda daunnya menggulung (Pranita *et al.*, 2016). Struktur daun pada tumbuhan paku sejati (disajikan pada **Gambar 2.9**) umumnya terdiri dari tangkai (stipe) dan helaian daun (lamina). Sumbu tengah lamina dinamakan dengan rachis. Percabangan pertama dari lamina dinamakan pinna, percabangan kedua dinamakan pinnule, serta pinnule dapat dibagi kembali menjadi segmen-segmen. Selain itu, sumbu tengah pinna dinamakan costa, sedangkan sumbu tengah pinnule dinamakan costule (Vasco *et al.*, 2013).



Gambar 2.9 Terminologi Daun Tumbuhan Paku

Sumber: (Vasco *et al.*, 2013)

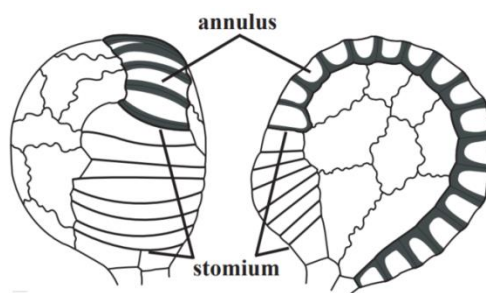
Pada daun muda tumbuhan paku terdapat dua karakter khas, yaitu *Fiddlehead* dan *Aerophore Line* yang ditunjukkan dalam **Gambar 2.10**. *Fiddlehead* disebut juga sebagai *Croziars* merupakan kuncup daun yang melingkar berfungsi untuk melindungi bagian meristematik yang masih lunak. Sedangkan aerofor tampak seperti garis berwarna terang di kedua sisi tangkai daun dan mengandung stomata, fungsinya agar udara memungkinkan berdifusi ke dalam jaringan parenkim longgar yang berada tepat di bawah garis tersebut (Vasco *et al.*, 2013). Selain itu, batang dan tangkai daun pada kebanyakan Polypodiopsida dilindungi oleh palea, yaitu suatu lapisan rambut-rambut yang berbentuk sisik (Tjitrosoepomo, 2014: 251).



Gambar 2.10 *Fiddlehead* dan *Aerophore Line* pada *Pteris livida*

Sumber: (Vasco *et al.*, 2013)

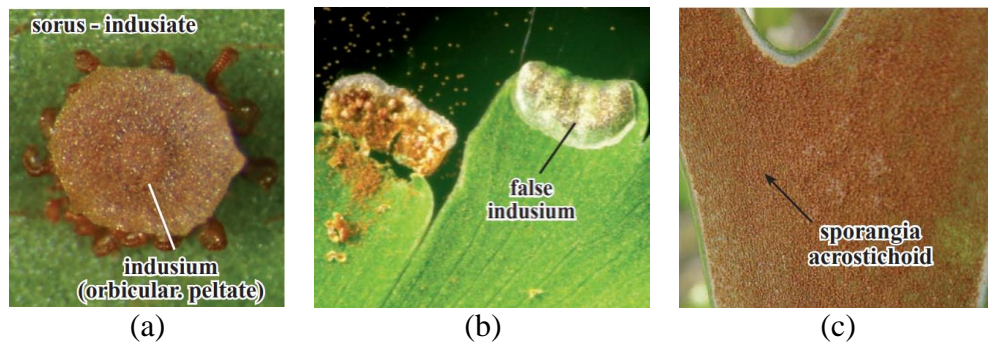
Kebanyakan tumbuhan paku yang termasuk ke dalam kelas Polypodiopsida memiliki tipe sporangium yaitu leptosporangium. Sporangium muncul dari suatu jaringan daun yang dinamakan dengan reseptakulum, pada dinding sporangium seringkali terdapat suatu struktur yang terdiri atas sel-sel menonjol dengan penebalan pada dinding radial dan dinding dalam dinamakan dengan annulus. Annulus tidak berupa lingkaran sempurna, melainkan hanya sebagian saja seperti bagian punggung, ujung sampai tengah-tengah sisi perut. Bagian sisi perut yang tidak mengalami penebalan dinamakan dengan stomium, bagian ini menjadi celah tempat keluarnya spora (**Gambar 2.11**) (Tjitrosoepomo, 2014: 251-252).



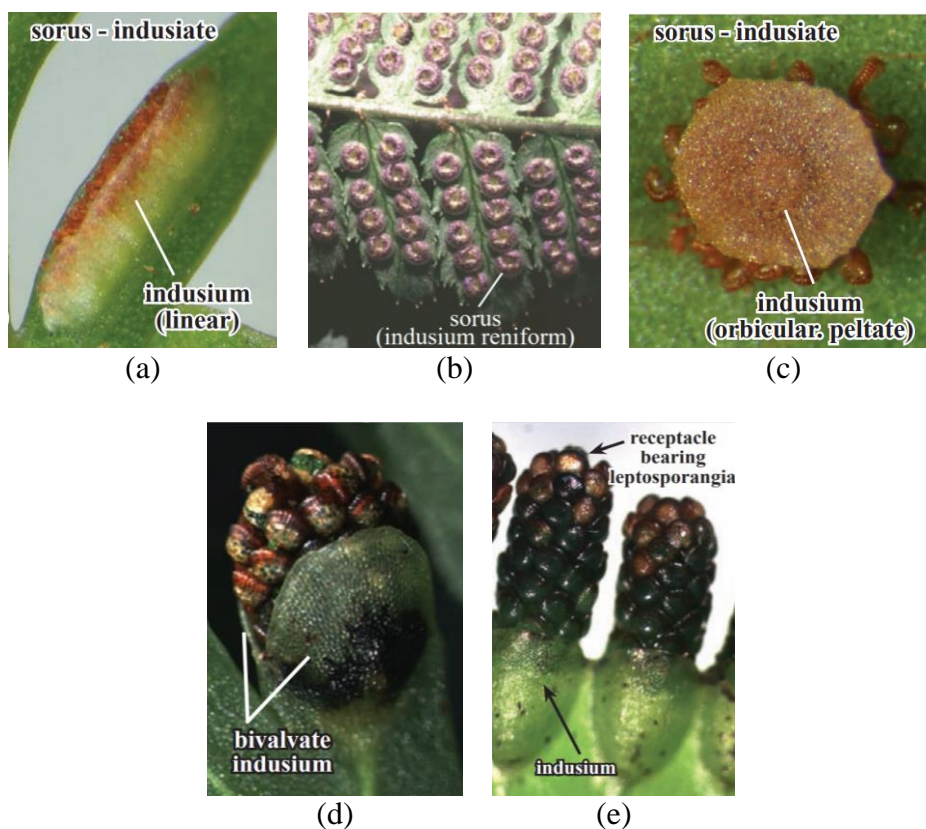
Gambar 2.11 Struktur Sporangium

Sumber: (Simpson, 2010: 105)

Kumpulan sporangium (sorus) yang belum matang dilapisi oleh suatu selaput yang dinamakan dengan indusium (*indusiate*) (**Gambar 2.12a**), namun beberapa tumbuhan paku ada yang tidak memiliki indusium (*exindusiate*) contohnya pada *Polypodium sp.* (**Gambar 2.4b**). Pada beberapa tumbuhan paku juga memiliki indusium yang hanya berupa pelebaran dari tepi daun yang dinamakan dengan indusium palsu (**Gambar 2.12b**). Selain itu, beberapa tumbuhan juga memiliki sporangium yang tidak terkumpul menjadi sorus (jamak: sori) melainkan menyebar di permukaan daun, kondisi tersebut dinamakan dengan *acrostichoid* (**Gambar 2.12c**). Salah satu contohnya adalah *Platyserium sp.* (Simpson, 2010: 103; Yatskievych, 2003: 4; see also Tjitrosoepomo, 2014: 251). Pada tumbuhan paku yang berindusium, memiliki variasi bentuk indusium yang berbeda-beda (**Gambar 2.13**) diantaranya berbentuk garis memanjang (linear), seperti ginjal (reniform), orbicular, peltate (memiliki tangkai indusium yang berada di tengah), *bivalvate*, dan conical (tubular) (Simpson, 2010: 103).



Gambar 2.12 (a) Sorus dengan Indusium; (b) Indusium Palsu; (c) Akrostikoid
Sumber: (Simpson, 2010: 104)



Gambar 2.13 Variasi Bentuk Indusium
(a) Linear (b) Reniform (c) Orbicular-peltate (d) Bivalvate (e) Tubular
Sumber: (Simpson, 2010: 104, 109, & 119)

Menurut Ruggiero *et al.* (2015) kelas Polypodiopsida dapat dibedakan menjadi empat sub kelas, yaitu Equisetidae, Marattidae, Ophioglossidae (Psilotidae), dan Polypodiidae.

1) Sub Kelas Equisetidae

Tumbuhan paku yang tergolong ke dalam sub kelas ini pada umumnya memiliki batang yang bercabang-cabang, berkarang, berbuku-buku, dan beruas-

ruas. Memiliki daun mikrofil seperti selaput dan tersusun berkarang. Sporofil biasanya berbentuk perisai dengan sejumlah sporangium di bawahnya, kemudian tersusun seperti suatu badan berbentuk kerucut pada ujung batang ataupun cabang yang dinamakan dengan strobilus (Tjitrosoepomo, 2014: 236). Sub kelas Equisetidae ini hanya memiliki satu ordo yaitu Equisetales (Ruggiero *et al.*, 2015).

Tumbuhan paku pada ordo ini memiliki rimpang yang merayap dengan cabang tegak, batang atau cabang beralur dan terdiri atas ruas-ruas yang panjang, serta daun berupa selapu atau sisik, berbentuk meruncing, dan mempunyai satu berkas pengangkut yang kecil. Bagian bawah pada daun-daun tersebut saling berlekatan membentuk suatu sarung yang menyelubungi batang, terutama pada bagian buku. Karena bentuk daun yang kecil, batang dan cabangnya memiliki fungsi sebagai asimilator, tampak berwarna hijau karena mengandung klorofil. Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Equisetum hyemale* (**Gambar 2.14**) (Brownsey & Perrie, 2015: 7).



Gambar 2.14 *Equisetum hyemale*
Sumber: (Brownsey & Perrie, 2015: 7)

2) Sub Kelas Marattiidae

Sub kelas Marattiidae ini hanya memiliki satu ordo yaitu ordo Marattiales (Ruggiero *et al.*, 2015). Tumbuhan paku pada ordo ini memiliki karakteristik daun yang besar dan menyirip ganda. Sporangiumnya terletak pada permukaan bawah daun, memiliki dinding yang tebal dan tidak memiliki anulus. Paku ini kebanyakan berupa paku tanah yang bersifat isospor. Selain itu, memiliki protalium yang berumur panjang, mikoriza endofitik, tumbuh di atas permukaan tanah, berwarna hijau, dan bentuknya seperti talus lumut hati. Contoh tumbuhan

paku pada ordo ini adalah *Christensenia aesculifolia* (**Gambar 2.15**) (Tjitrosoepomo, 2014: 248).



Gambar 2.15 *Christensenia aesculifolia*

Sumber: (Praptosuwiryo, 2013)

3) Sub Kelas Ophioglossidae (Psilotidae)

Sub kelas Ophioglossidae (Psilotidae) ini dibedakan menjadi dua ordo, yaitu ordo Ophioglossales dan ordo Psilotales (Ruggiero *et al.*, 2015).

- a) Ordo Ophioglossales, tumbuhan paku pada ordo ini memiliki batang yang pendek berada di dalam tanah serta pada akarnya terdapat mikoriza yang dapat membantu mendapatkan nutrisi. Daun memiliki bentuk khusus untuk asimilasi dan menghasilkan alat reproduksi. Daun yang fertil berbentuk malai atau bulir dan keluar dari bagian tangkai, pangkal, tengah, ataupun dari tepi daun yang steril. Selain itu, sporangium berbentuk hampir bulat, besar, tidak memiliki anulus, dan dindingnya kuat. Spora yang dihasilkan bersifat isospor. Tumbuhan paku ini hidup sebagai paku tanah dan paku epifit. Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Botrychium ternatum* (**Gambar 2.16**) (Tjitrosoepomo, 2014: 246-247).



Gambar 2.16 *Botrychium ternatum*

Sumber: (Krishidaya *et al.*, 2022)

- b) Ordo Psilotales, tumbuhan paku pada ordo ini tidak terdapat akar, bantalan batang berkurang, pembuluh tunggal, sporangium besar dengan dua dinding sel tebal, tidak memiliki anulus. Dua atau tiga sporangium dapat menyatu

membentuk synangium yang terletak pada sisi adaksial cabang daun. Spora berbentuk reniform, monolete serta jumlahnya sekitar > 1.000 per sporangium (Smith *et al.*, 2006). Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Psilotum nudum* (**Gambar 2.17**) (Tjitrosoepomo, 2014: 218).



Gambar 2.17 *Psilotum nudum*

(b) bracts; (sc) scaly leaves; (sy) synangium

Sumber: (Renjana & Firdiana, 2020)

4) Sub Kelas Polypodiidae

Menurut Ruggiero *et al.* (2015) sub kelas Polypodiidae ini dibedakan menjadi tujuh ordo, yaitu sebagai berikut:

- a) Ordo Cyatheales, beberapa spesies pada ordo ini ada yang memiliki batang seperti batang pada umumnya dan beberapa ada juga yang berupa rimpang merayap. Beberapa spesies hanya memiliki rambut pada batang dan bilahnya, serta ada juga yang memiliki sisik. Sorus terletak pada sisi abaksial ataupun marginal daun, ada yang terdapat di dalam indusium dan di luar indusium, spora berbentuk bulat atau tetrahedral, trilete, serta gametofit berwarna hijau dan berbentuk hati (Smith *et al.*, 2006). Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Cyathea medullaris* (**Gambar 2.18**) (Simpson, 2010: 117).



Gambar 2.18 *Cyathea medullaris*

Sumber: (Simpson, 2010: 117)

- b) Ordo Gleicheniales, memiliki sorus tidak tertutup oleh indusium dengan jumlah sporangium sedikit (sekitar 5–15 sporangium) dan tanpa tangkai, terletak pada sisi abaksial daun, membuka dengan satu celah membujur, serta anulus miring melintang. Sporangium matang secara bersamaan dalam sorus dengan jumlah spora sekitar 128–800 spora. Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Gleichenia linearis* (**Gambar 2.19**) (Tjitrosoepomo, 2014: 258-259; see also Smith et *al.*, 2006).



Gambar 2.19 *Dicranopteris linearis*

Sumber: (Perrie & Brownsey, 2015: 7)

- c) Ordo Hymenophyllales, berupa tumbuhan paku yang kecil dan terdiri atas satu lapis sel saja. Tumbuhan paku ini memiliki sorus yang terletak di tepi daun, indusium berbentuk piala atau bibir, sporangium tanpa tangkai, anulus yang sempurna dengan letak melintang, dan sporangium matang secara bertahap, serta protalium berbentuk pita atau benang. Paku pada famili ini hidup sebagai paku tanah dan paku epifit. Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah

Trichomanes javanicum (**Gambar 2.20**) (Tjitrosoepomo, 2014: 258-259; see also Smith et al., 2006).



Gambar 2.20 *Trichomanes javanicum*

Sumber: (Kinho, 2009: 41)

- d) Ordo Osmundales, memiliki sporangium yang tidak tersusun secara berkelompok, tidak bertangkai, tidak memiliki indusium, tidak memiliki anulus, memiliki sekelompok sel berdinding tebal. Sporangium terletak secara tersebar hingga terkadang dapat menutupi sebagian besar permukaan daun, tidak memiliki sisik, tetapi pada daun yang muda seringkali terdapat rambut-rambut yang dapat menghasilkan lender (Tjitrosoepomo, 2014: 256-257). Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Todea barbara* (**Gambar 2.21**) (Simpson, 2010: 108).



Gambar 2.21 *Todea barbara*

Sumber: (Simpson, 2010: 108)

- e) Ordo Polypodiales, memiliki sorus yang bentuknya bermacam-macam (garis-garis, memanjang, atau bulat), terletak pada tepi atau dekat tepi daun, dapat pula pada urat-urat daun. Kadang-kadang sporangium dapat menutupi

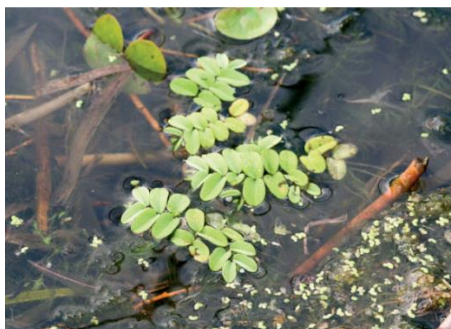
permukaan bawah daun yang fertil. Sporangium bertangkai dengan anulus vertikal tidak sempurna, apabila matang pecah dengan celah spora melintang. Paku ini memiliki rimpang merayap atau berdiri, beruas-ruas dan jarang memperlihatkan batang yang nyata. Daunnya memiliki bentuk yang bermacam-macam, tunggal atau majemuk, dengan urat daun yang bebas atau saling berdekatan. Gametofit biasanya berwarna hijau dan berbentuk hati (terkadang berbentuk pita di beberapa paku epifit). Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Asplenium nidus* (**Gambar 2.22**) (Tjitrosoepomo, 2014: 264; see also Smith et al., 2006).



Gambar 2.22 *Asplenium nidus*

Sumber: (Simpson, 2010: 118)

- f) Ordo Salviniales, hampir semua tumbuhan paku yang tergolong ke dalam ordo ini hidup di air dan bersifat heterospor. Makrosporangium dan mikrosporangiumnya memiliki dinding yang tipis, tidak memiliki anulus dan terletak di dalam suatu badan pada pangkal daun. Suatu badan yang mengandung sporangium tersebut dinamakan dengan sporokarpium. Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Salvinia natans* (**Gambar 2.23**) (Tjitrosoepomo, 2014: 280-282).



Gambar 2.23 *Salvinia natans*

Sumber: (Criado et al., 2017: 38)

- g) Ordo Schizaeales, memiliki sporangium yang tidak bertangkai, terpisah-pisah, pada saat masak membuka dengan satu celah membujur, anulus pendek dan letaknya melintang dekat ujung sporangium. Pada paku ini, daun yang fertil dan steril memiliki bentuk yang berbeda, serta memiliki rambut atau sisik-sisik. Contoh tumbuhan paku pada ordo ini adalah *Lygodium circinnatum* (**Gambar 2.24**) (Tjitrosoepomo, 2014: 257-258).



Gambar 2.24 *Lygodium circinnatum*

Sumber: (Kinho, 2009: 29)

Berdasarkan pendapat para ahli tersebut, penulis menyimpulkan bahwa tumbuhan yang tergolong ke dalam kelas Polypodiopsida merupakan tumbuhan yang paling banyak ditemukan di berbagai lingkungan. Terdapat karakter khusus pada tumbuhan paku Polypodiopsida, yaitu daun dengan ukuran yang relatif besar serta pada saat muda daunnya menggulung. Tumbuhan ini ada yang tumbuh sebagai paku tanah (terrestrial), paku epifit dan paku air. Perbedaan habitat tersebut menyebabkan terdapat perbedaan letak dan bentuk sporangia antara tumbuhan paku sejati yang hidup di darat dengan yang hidup di air.

2.1.3 Klasifikasi

Klasifikasi merupakan suatu cara penyusunan atau pengelompokan organisme-organisme ke dalam beberapa kelompok yang didasarkan pada kesamaan karakteristik kelompok tersebut (Singh, 2010: 10). Salah satu tujuan dari sistem klasifikasi adalah untuk mengekspresikan hubungan antar organisme pada suatu kelompok. Terdapat dua metode utama dalam sistem klasifikasi yaitu klasifikasi fenetik dan klasifikasi filogenetik (Simpson, 2010: 12-13).

2.1.3.1 Klasifikasi Fenetik

Fenetik didefinisikan sebagai suatu metode klasifikasi berdasarkan kesamaan karakter-karakter dari berbagai sumber seperti morfologi, anatomi, palinologi, embriologi, fitokimia, ultrastruktur, atau dari bidang studi lainnya untuk menggambarkan hubungan kekerabatan (Singh, 2010: 10; see also Rincon *et al.*, 1996). Semakin banyak kesamaan karakter yang dimiliki oleh suatu kelompok organisme, maka semakin dekat kekerabatan organisme dalam kelompok tersebut, begitupun sebaliknya (Davis & Heywood dalam Kundariati *et al.*, 2021). Pengelompokan secara fenetik ini dapat direpresentasikan ke dalam sebuah diagram yang disebut fenogram (Simpson, 2010: 42). Klasifikasi fenetik dapat dilakukan melalui taksonomi numerik (taksometrik).

Taksonomi numerik adalah pengelompokan melalui metode numerik dari unit taksonomi ke dalam suatu taksa berdasarkan karakteristik yang dimiliki (Sneath & Sokal dalam Idami & Nasution, 2019). Dalam pelaksanaan taksonomi numerik dapat dilakukan dengan bantuan komputer untuk melakukan penilaian kuantitatif terhadap sejumlah besar karakter dari organisme-organisme yang sedang diteliti (Stuessy, 2009: 53). Berikut merupakan tahapan-tahapan taksonomi numerik:

1) Pemilihan *Operational Taxonomic Unit* (OTU)

Operational Taxonomic Unit merupakan unit paling dasar (taxa terendah) sebagai obyek studi yang akan diteliti. OTU yang diklasifikasikan dapat berupa famili, spesies, atau entitas taksonomi lainnya. Dalam pemilihan OTU dipastikan dapat mewakili golongan organisme yang sedang diteliti (Stace, 1989: 45).

2) Pemilihan Karakter dan Pengkodean (Pemberian Skor)

Karakter didefinisikan sebagai ciri dari suatu organisme yang dapat dibagi setidaknya menjadi dua kondisi, ekspresi atau keadaan yang dapat digunakan untuk merekonstruksi klasifikasi. Kondisi, ekspresi, atau keadaan pada suatu karakter dinamakan dengan status karakter (*character state*). Karakter yang digunakan dapat berupa karakter kuantitatif atau karakter kualitatif (Stuessy, 2009: 26 & 28). Jumlah karakter yang digunakan minimal 60 unit karakter dan

idealnya lebih dari 100 unit karakter (Stace, 1989: 45). Sedangkan status karakter yang digunakan tidak lebih dari 6 ekspresi (Kendrick dalam Stuessy, 2009: 29).

Status karakter dapat terdiri dari hanya dua status karakter saja (*two-state characters*) atau terdiri dari banyak status karakter (*multistate characters*). *Two-state characters* menyatakan ada dan tidaknya suatu karakter, sehingga dapat dikodekan dengan kode biner yaitu 0 dan 1 atau – dan +. Sedangkan *multistate characters* menyatakan terdapat banyak ekspresi dari suatu karakter, sehingga dikodekan dengan skala angka (misalnya 0, 1, 2, dan 3). Setelah diberikan kode, OTU dan karakter disusun dalam bentuk *matrix data* dengan format OTU x karakter (t x n) (Stace, 1989: 45-47; Stuessy, 2009: 60).

3) Pengukuran Kemiripan

Pengukuran kemiripan dilakukan dengan membandingkan setiap karakter pada setiap pasangan OTU, dari *matrix data* t x n. Pengukuran kemiripan dapat dilakukan melalui perhitungan jarak yang direpresentasikan sebagai ketidaksamaan antar pasangan OTU. Hasil pengukuran kemiripan ini dapat berupa *similarity matrix* (matriks kesamaan) atau *dissimilarity matrix* (matriks ketidaksamaan) yang disajikan dalam *matrix data* dengan format t x t (Singh, 2010: 234-235; Stace, 1989: 47).

4) Analisis Kelompok (*Cluster Analysis*)

Analisis klaster dilakukan untuk mengelompokkan OTU yang memiliki nilai kemiripan paling dekat sehingga dapat berada pada *cluster* yang sama. Hasil pengklasteran ini dapat divisualisasikan secara hierarki dalam suatu diagram yang dinamakan fenogram (Stace, 1989: 47).

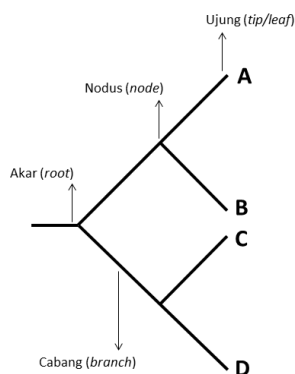
5) Ordinasi

Ordinasi merupakan suatu teknik untuk menentukan penempatan OTU dalam dua dimensi atau ruang tiga dimensi. Hasil ordinasi secara mudah direpresentasikan dengan diagram sebar (*scatter diagram*) atau model tiga dimensi. Teknik ini bekerja pada nilai jarak yang dihitung langsung dari data yang dikodekan atau secara tidak langsung dari nilai kemiripan yang sudah dihitung. Teknik ordinasi yang umum digunakan adalah PCA (*Principal Component Analysis*) (Singh, 2010: 249). PCA merupakan salah satu teknik analisis statistik

yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik organisme yang memiliki kontribusi tinggi terhadap variasi yang diamati dalam suatu kelompok (Afuape *et al.*, 2011). Hasil analisis ini berupa Komponen Utama/*Principle Component* (PC) yang ditentukan berdasarkan *eigen value* (nilai karakter) (Singh, 2010: 250).

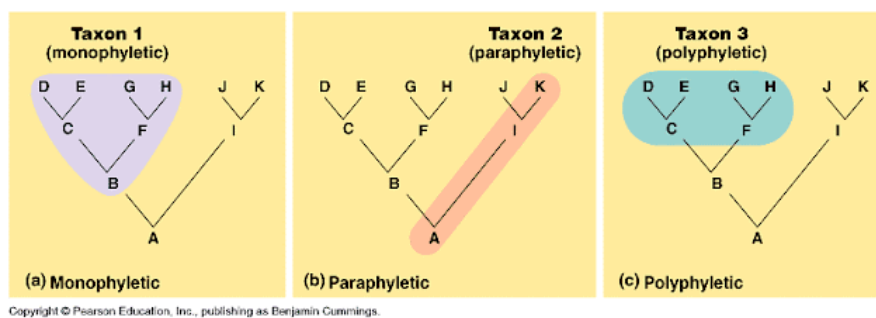
2.1.3.2 Klasifikasi Filogenetik

Klasifikasi filogenetik merupakan suatu metode klasifikasi berdasarkan sejarah evolusi atau pola keturunan (Simpson, 2010: 13). Hubungan kekerabatan secara filogenetik dapat digambarkan dalam suatu pohon filogenetik yang disebut cladogram (Irawan dalam Subari *et al.*, 2021); (Simpson, 2010: 13). Pohon filogenetik ini digunakan untuk menguji dan memeriksa hubungan antar organisme (Kannan & Wheeler, 2012). Berdasarkan **Gambar 2.25**, struktur pohon filogenetik terdiri atas akar (*root*) serta nodus (*node*) yang dihubungkan oleh cabang (*branch*). Akar mewakili nenek moyang atau leluhur, setiap cabang menunjukkan garis keturunan genetik, nodus yang terletak di bagian ujung dinamakan dengan nodus terminal (*terminal node*), ujung (*tip*) atau daun (*leaf*) yang mewakili unit taksonomi yang dibandingkan (*Operational Taxonomical Unit/OTU*), sedangkan nodus di bagian dalam yang menjadi titik percabangan dinamakan nodus internal (*internal node*) yang mewakili unit nenek moyang kedua dari turunan yang memisah darinya (*Hypothetical Taxonomical Unit/HTU*) (Aprilyanto & Sembiring, 2016: 76; Masud & Abdullah, 2017; see also Yang & Rannala, 2012).



Gambar 2.25 Struktur Pohon Filogenetik
Sumber: (Aprilyanto & Sembiring, 2016: 77)

Dalam analisis filogenetika, apabila suatu kelompok organisme yang anggotanya memiliki persamaan karakter yang banyak dianggap memiliki kekerabatan yang sangat dekat dan diperkirakan berasal dari nenek moyang yang sama. Terdapat tiga model kladistik dalam mengevaluasi suatu pohon filogenetik yang tercantum pada **Gambar 2.26**, yaitu monofiletik, polifiletik dan parafiletik. Monofiletik merupakan bentuk ideal dari taksonomi, yaitu jika *common ancestor* menghasilkan semua taksa yang diturunkan, polifiletik berarti yakni turunan yang memiliki garis keturunan dua atau lebih pada *common ancestor* yang berbeda, sedangkan parafiletik yakni taksa yang tidak termasuk ke dalam spesies yang memiliki *common ancestor* yang sama, tetapi menurunkan spesies yang termasuk ke dalam kelompok taksa tersebut (Lemey *et al.* dalam Septiadi, 2019).



Gambar 2.26 Model-model Kladistik

Sumber: (Hershkovitz & Leipe dalam Septiadi, 2019)

Berikut ini merupakan tahapan-tahapan analisis filogenetik:

1) Pemilihan Data Sekuen DNA

Dalam melakukan rekonstruksi pohon filogenetik diperlukan sekuen DNA tertentu yang dapat digunakan sebagai penanda (*marker*), sekuen tersebut dinamakan DNA *Barcode* (Irawan *et al.*, 2016). DNA *Barcode* merupakan urutan basa nukleotida dari suatu DNA dengan berukuran pendek yang berasal dari satu ataupun beberapa bagian genom yang telah terstandarisasi, serta dapat digunakan untuk mengidentifikasi spesies secara praktis (Spooner, 2009). DNA Barcode terdiri dari urutan gen pendek yang ukurannya kurang dari 700 pasangan basa (bp) (Hebert *et al.* dalam Dick & Kress, 2009). Sekuen DNA *Barcode* dapat diperoleh dari beberapa sumber, yaitu inti (nDNA), kloroplas (cpDNA) dan mitokondria (mDNA) (T. Hidayat & Pancoro, 2008).

Pemilihan data sekuen DNA untuk analisis filogenetik perlu diperhatikan bahwa sekuen berasal dari sumber yang spesifik (baik itu dari genom inti, kloroplas maupun mitokondria), sekuen bersifat homolog (diturunkan dari satu nenek moyang), sekuen memiliki sejarah evolusi yang sama, dan setiap sekuen berkembang secara bebas (Hershkovitz dan Leipe dalam Hidayat & Pancoro, 2008). Sekuen DNA yang digunakan dapat berupa sekuen nukleotida ataupun sekuen protein (Battistuzzi & Kumar, 2020). Penanda (*marker*) yang dapat digunakan sebagai DNA *Barcode* standar untuk tumbuhan yang telah terstandarisasi dan direkomendasikan oleh *The Consortium for the Barcode of Life* (CBOL) salah satunya adalah gen *rbcL* (Daravath *et al.*, 2018: 5-8; Hollingsworth *et al.*, 2009).

Gen *rbcL* merupakan gen yang mengkodekan subunit besar RuBisCO (ribulosa 1,5-biphosphate carboxylase), sebuah enzim yang memiliki peran penting dalam proses fotosintesis (Wall & Herbeck, 2003). Pada umumnya gen *rbcL* ini memiliki panjang sekitar 1.400 pasangan basa (Janzen dalam Shinwari *et al.*, 2018). Sekuens gen *rbcL* telah banyak digunakan dalam studi evolusi, filogenetik, biogeografi, genetika populasi, dan sistematika (Wongsawad & Peerapornpisal, 2014). Gen *rbcL* diketahui memiliki tingkat mutasi yang rendah dibandingkan dengan penanda DNA kloroplas yang lainnya, sehingga gen dapat digunakan sebagai penanda yang baik untuk tumbuhan (Mursyidin & Makruf, 2020). Selain itu, sebagai penanda molekuler gen *rbcL* ini memiliki variasi yang cukup tinggi untuk membedakan jenis-jenis tumbuhan (Dong *et al.*, 2013).

2) *Sequence Alignment*

Pada tahap ini data-data gen yang sudah diperoleh dilakukan pengurutan sekuen untuk mengetahui homologi antar satu sekuen dengan sekuen lainnya. Tahapan ini penting dilakukan karena sekuen gen tertentu memiliki panjang yang berbeda pada spesies yang berbeda. Akurasi dari tahapan ini menentukan keberhasilan analisis filogenetik (Battistuzzi & Kumar, 2020; see also Septiadi, 2019). Pada tahapan ini, umumnya terdapat *gap* yang dihasilkan karena adanya perubahan mutasi dalam sekuen termasuk insersi, delesi atau penyusunan ulang materi genetik. Panjang *gap* dapat terjadi karena adanya introduksi tunggal yang

memutuskan seberapa banyak perubahan individu yang telah terjadi dan apa perintangannya. *Gap* dalam beberapa program filogenetik diberikan perlakuan, namun tidak ada *clear-cut* model seperti bagaimana seharusnya *gap* tersebut di perlakukan. Beberapa metode mengabaikan *gap* yang terjadi dan hanya fokus terhadap penyejajaran yang tidak memiliki *gap*, walaupun *gap* dapat berguna sebagai penanda filogenetik di beberapa situasi (Dharmayanti, 2011).

3) Rekonstruksi Pohon Filogenetik

Rekonstruksi pohon filogenetik (cladogram/filogram) dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa algoritma yang berbeda. Algoritma yang paling umum digunakan adalah *Neighbour Joining* (Ningrum & Chasani, 2021). Metode ini menggunakan pengklasteran halnya pada metode UPGMA tetapi tidak mengasumsikan kesetaraan laju evolusi antar taksa, melainkan melalui perhitungan jarak evolusi yang laju evolusinya tidak sama pada setiap cabangnya (Aprilyanto & Sembiring, 2016: 91; Hills dalam Septiadi, 2019).

4) Evaluasi Pohon Filogenetik

Evaluasi pohon filogenetik, dilakukan dengan cara uji reliabilitas yaitu *bootstrap test* (menentukan nilai kepercayaan *bootstrap* dalam suatu pohon filogenetik dengan prinsip pengulangan) atau *interior branch test* (mengestimasi pohon dengan menguji reliabilitas setiap cabang sebelah dalam), serta uji topologi antara dua atau lebih pohon filogenetik dengan menggunakan metode yang berbeda (Nei & Kumar, 2000: 165-177). Pada analisis *bootstrap* melibatkan urutan set sekuens baru melalui *resampling* dengan situs pengganti (kolom) set asli, membangun pohon untuk setiap set baru, serta menghitung persentase kemungkinan klaster muncul kembali dalam replikasi *bootstrap*. Persentase tersebut dinamakan dengan nilai *bootstrap* (Singh, 2010: 255).

Berdasarkan pendapat para ahli diatas mengenai klasifikasi (pengelompokkan) tumbuhan, maka penulis menyimpulkan bahwa untuk mengetahui pola pengelompokkan antar organisme dapat dilakukan melalui kajian klasifikasi dengan menggunakan dua metode, yaitu klasifikasi fenetik dan klasifikasi filogenetik. Kedua metode klasifikasi ini didasarkan pada sumber yang berbeda, yaitu klasifikasi fenetik didasarkan pada persamaan keseluruhan karakter

yang dimiliki, sedangkan klasifikasi filogenetik didasarkan pada sejarah evolusinya.

2.1.4 Gunung Galunggung

Gunung Galunggung merupakan salah satu wisata alam yang berada di Kabupaten Tasikmalaya yang masih berstatus aktif hingga saat ini, dengan ketinggian 2.168 mdpl atau 1.820 m dari daratan Kota Tasikmalaya serta letak astronomis berada pada koordinat 7.25° - $7^{\circ}15'0''$ LS dan $108,058^{\circ}$ - $108^{\circ}3'30''$ BT. Dalam sejarahnya, Gunung Galunggung tercatat telah mengalami 4 kali meletus yaitu pada tahun 1822, 1894, 1918, dan 1982 (Mulyanie & Hakim, 2016; Widodo, 2014; see also Zuhri *et al.*, 2016).

Kawasan Gunung Galunggung telah dikembangkan menjadi suatu objek wisata dengan nama “Hutan Wanawisata Galunggung” sejak tahun 1988 dengan luas sekitar 120 ha yang dikelola oleh Perum Perhutani (Widodo, 2014). Area hutan di Gunung Galunggung terdiri dari Hutan Lindung dengan luas sekitar 5.012 ha dan Hutan Pinus dengan luas sekitar 5.473 ha (Zuhri *et al.*, 2016). Selain itu, terdapat beberapa objek wisata yang terdapat di kawasan Gunung Galunggung terdiri dari Kawah Gunung Galunggung, Pemandian Air Panas, Curug Agung, dan Curug Cikahuripan (Rizal *et al.*, 2021). Hal tersebut menjadi daya tarik bagi para wisatawan untuk berkunjung ke kawasan Gunung Galunggung.



Gambar 2.27 Gunung Galunggung
Sumber: Dokumentasi Pribadi (2022)

Selain objek wisatanya, Gunung Galunggung juga menyimpan kekayaan alam berupa flora dengan ciri khas tersendiri yang masih dapat bertahan hingga

saat ini, meskipun kondisi ekologis serta vegetasinya sudah tidak sealaminya beberapa waktu sebelumnya (Putra & Fitriani, 2018). Salah satu tumbuhan yang mendominasi di Kawasan Gunung Galunggung adalah paku pohon (*Cyathea contaminans*) (Zuhri *et al.*, 2016).

Berdasarkan penjelasan di atas, penulis menyimpulkan bahwa Gunung Galunggung merupakan satu-satunya gunung berapi yang berada di Kabupaten Tasikmalaya dengan status aktif hingga saat ini. Kawasan Gunung Galunggung memiliki berbagai objek wisata alam yang menarik para wisatawan untuk berkunjung. Selain itu, kawasan Gunung Galunggung juga masih menyimpan berbagai keanekaragaman hayati flora salah satunya tumbuhan paku, yang dapat dijadikan sebagai salah satu objek penelitian.

2.1.5 Sumber Belajar Biologi

Pada dasarnya proses pembelajaran biologi memiliki hubungan dengan alam dan lingkungan sekitar, sehingga guru dituntut agar dapat memanfaatkan potensi alam dan fenomena lingkungan sebagai sumber belajar, dengan memotivasi dan membimbing peserta didik pada kegiatan penginderaan seperti mengamati, menerima, menggali serta mengolah informasi yang telah diperoleh (Suryaningsih, 2018). Sumber belajar sendiri merupakan semua sumber baik itu berupa pesan, orang, bahan, alat, teknik, serta latar yang dimanfaatkan oleh peserta didik sebagai sumber untuk kegiatan belajar dan dapat meningkatkan kualitas belajarnya.

Duffy dan Jonassen juga mengatakan bahwa manfaat dari berbagai sumber belajar merupakan upaya pemecahan masalah belajar (Abdullah, 2012). Hal tersebut membuktikan bahwa dalam melaksanakan pembelajaran, peserta didik tidak hanya memperoleh pembelajaran dari penjelasan guru saja, melainkan dari proses penginderaan peserta didik dalam menerima sebuah informasi.

Selain itu, Marsh mengemukakan bahwa sumber belajar biologi adalah segala sesuatu, baik benda maupun gejalanya, yang dapat digunakan untuk memperoleh pengalaman dalam rangka pemecahan permasalahan biologi tertentu (Suhardi dalam Suryaningsih, 2018). Pemanfaatan sumber belajar dalam mendukung proses pembelajaran tentunya dapat beranekaragam jenis dan bentuknya, baik itu

berupa buku saku, booklet, majalah, dan sebagainya. Berdasarkan pendapat para ahli tersebut, penulis menyimpulkan bahwa sumber belajar merupakan segala sesuatu yang berasal dari apapun yang memuat sejumlah informasi dan pengetahuan untuk menunjang proses pembelajaran serta meningkatkan kemampuan dan keterampilan seseorang dalam pemecahan masalah belajar.

2.2 Hasil Penelitian yang Relevan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Suryadi *et al.* (2020) memberikan hasil bahwa tumbuhan paku pada kelas Filicinae yang memiliki hubungan kekerabatan terdekat adalah *Nephrolepis cordifolia* (L.) Schott. dan *Nephrolepis biserrata* (Sw.) Schott dengan nilai jarak takson terkecil yaitu 1,73 dengan persamaan karakteristik yaitu habitat terrestrial, *fiddlehead* halus dan bersisik, permukaan rachis halus dan berwarna coklat kehitaman, anatomi batang silindris, ruang besar antara sel punca dan silinder vaskular pusat (stele) berbentuk silinder, daunnya monomorfik, majemuk menyirip, daun berseling, daun tebal dan berdaging, costa terlihat, venasi daun kasar, dan mengandung ruang interokular yang besar, sel-sel tetangga terdiri dari dua sel sempit, dan rizoid telah membentuk akar nyata. Sedangkan tumbuhan paku yang memiliki kekerabatan paling jauh adalah *Nephrolepis cordifolia* (L.) Schott., *Nephrolepis biserrata* (Sw.) Schott., *Crypinus enervis* (Cav.) Copel., *Davalia denticulata* (Burm. F.) Mett. Ex Kuhn., *Drynaria bonni* H. Crist., *Adiantum caudatum* L., *Pyrrosia piloseloides* (L.), M.G. Presl., dan *Pteris vitata* L., dengan nilai jarak takson yaitu 4,36.

Penelitian yang lain yang dilakukan oleh Patigu *et al.* (2019) dengan hasil bahwa hubungan kekerabatan yang paling dekat yaitu *Asplenium macrophyllum* dan *Asplenium confusum* dengan indeks similaritas antara 0,70-1%. Sedangkan hubungan kekerabatan terjauh yaitu terdapat pada node 7 (*Asplenium confusum*, *Asplenium macrophyllum*, *Asplenium nidus*, *Nephrolepis biserrata* dan *Diplazium esculentum*) dan spesies pada node 8 (*Stenochlaena palustris*, *Pityrogramma calomelanos*, *Selaginella plana*, *Vittaria elongata* dan *Drymoglossum piloselloides*) yang didukung oleh indeks similaritas dibawah 0,44%.

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Trujillo-Argueta *et al.* (2021) menyimpulkan bahwa gen *rbcLa* dan gen *trnH-psbA* berkinerja relatif baik sebagai *marker DNA Barcode* tumbuhan paku di Mixteca Alta Oaxaca. Selain itu, gen *rbcLa* memiliki ketersediaan *database* sekuens tumbuhan paku yang cukup banyak. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Li *et al.* (2011) mengemukakan bahwa mendukung gen *rbcL* dan gen *matK* sebagai *DNA Barcode* inti resmi untuk tumbuhan paku. Gen *matK* dan *rbcL* memberikan daya pembeda tertinggi di dalam kompleks spesies yang diwakili oleh dua genera polypoda sebagai fokus peneliti.

2.3 Kerangka Konseptual

Tumbuhan paku merupakan salah satu tumbuhan tingkat rendah yang karakteristiknya peralihan antara tumbuhan bertalus dengan tumbuhan berkormus. Tumbuhan paku dari segi morfologinya telah jelas memiliki kormus sehingga dapat dibedakan bagian antara akar, batang dan daunnya. Maka dari itu, tumbuhan paku ini dikelompokkan dalam Phylum Tracheophyta yang pada bagian tubuhnya memiliki sistem pembuluh yang telah jelas. Keberadaan tumbuhan paku sangat heterogen, dapat ditemukan di berbagai tempat seperti tanah (terrestrial), permukaan batu, menempel pada pohon (epifit), dan air (higrofit) dengan kondisi lingkungan yang lembab dan ternaungi. Tumbuhan paku yang banyak ditemui di Indonesia adalah tumbuhan paku yang termasuk ke dalam kelas Polypodiopsida. Hal tersebut sejalan dengan hasil observasi yang telah dilakukan di Kawasan Gunung Galunggung, banyak ditemukan tumbuhan paku yang termasuk ke dalam kelas tersebut.

Penelitian mengenai tumbuhan paku sejati di Kawasan Gunung Galunggung belum banyak dilakukan, sehingga informasi mengenai keanekaragaman tumbuhan paku terutama yang termasuk kedalam kelas Polypodiopsida di kawasan tersebut masih sangat terbatas. Namun pada kenyataannya tumbuhan paku yang ditemukan pada saat observasi awal di kawasan tersebut sangat beragam. Oleh karena itu, diperlukan penelitian-penelitian kembali untuk mengeksplorasi keberagaman jenis tumbuhan paku pada kelas Polypodiopsida, sebagai *database* dalam upaya memperkaya informasi serta

inventarisasi untuk mencegah kepunahan. Hal tersebut dapat dilakukan melalui observasi jenis-jenis tumbuhan paku pada kelas Polypodiopsida serta analisis pengelompokkannya baik secara fenetik maupun filogenetik.

Analisis pengelompokkan secara fenetik dilakukan berdasarkan kemiripan secara keseluruhan dari karakter fenotipik yang dimiliki oleh masing-masing tumbuhan paku sejati pada kelas Polypodiopsida. Namun, karakter fenotipik pada tumbuhan dapat dipengaruhi dengan mudah oleh kondisi lingkungan maupun perbedaan umur dari tumbuhan tersebut. Maka dari itu diperlukan analisis pengelompokkan secara filogenetik sebagai perbandingan pola pengelompokkan secara fenetik. Analisis pengelompokkan secara filogenetik memerlukan sekuen DNA sebagai penanda molekuler. Salah satu penanda molekuler pada tumbuhan yang telah direkomendasikan oleh *The Consortium for the Barcode of Life* (CBOL) adalah gen *rbcL*.

Kedua analisis tersebut dapat memberikan gambaran perbandingan pengelompokkan tumbuhan paku terutama pada kelas Polypodiopsida dari Kawasan Gunung Galunggung untuk mengetahui posisi taksonnya. Berdasarkan uraian tersebut, hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi dunia pendidikan sebagai sumber belajar khususnya dalam pembelajaran biologi. Sumber belajar yang disajikan dalam bentuk buku saku, yang memuat informasi mengenai tumbuhan paku sejati (Polypodiopsida) serta dasar-dasar klasifikasi baik secara fenetik maupun filogenetik.

2.4 Pertanyaan Penelitian

Adapun pertanyaan penelitian terkait penelitian yang akan dilaksanakan adalah sebagai berikut:

- 1) Bagaimanakah karakteristik morfologi dan palinologi dari masing-masing jenis tumbuhan paku sejati (Polypodiopsida) yang berada di kawasan Gunung Galunggung?
- 2) Bagaimanakah hasil analisis pengelompokkan tumbuhan paku sejati (Polypodiopsida) yang berada di kawasan Gunung Galunggung berdasarkan data fenetik?

- 3) Bagaimanakah hasil analisis pengelompokan tumbuhan paku sejati (Polypodiopsida) yang berada di kawasan Gunung Galunggung berdasarkan data filogenetik?
- 4) Apakah terdapat persamaan dan perbedaan pengelompokan tumbuhan paku sejati (Polypodiopsida) yang berada di kawasan Gunung Galunggung berdasarkan data fenetik dan filogenetik?