

DINAMIKA DIFERENSIASI SEL TANAMAN: DARI PEMBENTUKAN JARINGAN VASKULAR HINGGA EKSPRESI GEN PENGATUR PERKEMBANGAN

Citra Imanda Salsabilah¹, Wan Syaflī²

¹Biologi, FKIP, Universitas Riau

²Biologi, FKIP, Universitas Riau

¹citra.imanda6183@grad.unri.ac.id

ABSTRACT

Plant cell differentiation is a fundamental developmental process that determines cellular identity, specialization, and the formation of functional tissues and organs. This process is regulated through a coordinated interplay of plant hormones, transcription factors, and epigenetic mechanisms. Auxin and cytokinin serve as key hormonal signals that guide vascular patterning, particularly the differentiation of xylem and phloem. Transcription factors such as the VASCULAR-RELATED NAC-DOMAIN (VND) family, NAC, and HD-ZIP III play essential roles in directing cell fate and activating secondary cell wall formation. In addition, epigenetic mechanisms including DNA methylation and chromatin remodeling maintain long-term stability of differentiated states. This literature review aims to synthesize current scientific findings on major patterns and regulatory mechanisms of plant cell differentiation. A deeper understanding of these mechanisms provides valuable insights for plant physiology, biotechnology, and crop improvement, especially in enhancing growth, adaptation, and productivity.

Keywords: *plant cell differentiation, vascular tissue, gene regulation, epigenetics*

ABSTRAK

Diferensiasi sel tanaman merupakan proses penting yang menentukan identitas, fungsi, dan spesialisasi sel dalam pembentukan jaringan serta organ. Proses ini dikendalikan melalui interaksi kompleks antara hormon tanaman, faktor transkripsi, dan regulasi epigenetik. Auksin dan sitokinin menjadi sinyal hormonal utama yang mengarahkan pembentukan pola vaskular, termasuk diferensiasi xilem dan floem. Faktor transkripsi seperti keluarga VND (VASCULAR-RELATED NAC-DOMAIN), NAC, dan HD-ZIP III berperan dalam menentukan arah nasib sel dan pembentukan dinding sel sekunder. Selain itu, regulasi epigenetik seperti metilasi DNA dan perubahan struktur kromatin menjaga stabilitas jangka panjang status diferensiasi. Studi literatur ini bertujuan menguraikan pola dan mekanisme utama diferensiasi sel tanaman berdasarkan berbagai publikasi ilmiah terkini. Pemahaman mendalam mengenai mekanisme diferensiasi sel tanaman memberikan kontribusi signifikan terhadap bidang fisiologi, bioteknologi, dan rekayasa tanaman, terutama dalam upaya meningkatkan pertumbuhan, adaptasi, serta produktivitas tanaman.

Kata Kunci: diferensiasi sel, jaringan vaskular, regulasi gen, epigenetik

A. Pendahuluan

Diferensiasi sel tanaman merupakan proses kompleks yang dikendalikan oleh interaksi hormon, regulasi genetik, dan dinamika fisiologis pada tingkat jaringan. Proses ini tidak hanya ditentukan oleh perubahan struktural di tingkat sel, tetapi juga oleh pengaturan sinyal internal yang mengontrol arah perkembangan jaringan. Penelitian nasional menunjukkan bahwa hormon auksin memegang peran sentral dalam menentukan arah pembentukan jaringan vaskular, terutama melalui pengaturan gradien konsentrasi yang memengaruhi aliran polar dan pembelahan sel di daerah meristematik (Putra et al., 2021; Ananta & Lestari, 2021). Gradien auksin yang stabil berkontribusi pada pembentukan pola vaskular yang teratur, sementara ketidakseimbangan hormon ini diketahui mengganggu diferensiasi xilem pada beberapa tanaman perkebunan. Selain itu, sitokinin memberikan kontribusi penting dalam menyeimbangkan pembentukan xilem dan floem, terutama dengan meningkatkan pembelahan sel pada jaringan kambium dan mempercepat pematangan sel-sel vaskular

(Ardiyanti & Prasetyo, 2020; Anggraeni et al., 2022).

Pada level molekuler, pembentukan xilem sangat dipengaruhi oleh regulasi faktor transkripsi yang mengontrol lignifikasi dan penebalan dinding sel. Studi nasional melaporkan bahwa peningkatan ekspresi gen yang mengatur pembentukan lignin berkorelasi dengan pematangan elemen trachea, sehingga menghasilkan jalur transportasi air yang lebih efisien (Triana et al., 2023; Larasati & Anggraini, 2020). Proses ini juga melibatkan aktivitas enzim yang mendorong penguatan dinding sel, suatu mekanisme yang penting untuk ketahanan struktur jaringan pembuluh. Di sisi lain, pembentukan floem dikendalikan oleh serangkaian gen yang mengontrol identitas sel pengangkut, seperti sel tapis dan sel pengiring. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa keseimbangan antara auksin, sitokinin, dan hormon lainnya seperti giberelin berperan besar dalam menjaga kelangsungan perkembangan floem secara optimal (Sari & Permata, 2024; Ramadhani et al., 2023).

Selain regulasi hormonal dan genetik, proses diferensiasi sel

tanaman juga sangat dipengaruhi oleh mekanisme epigenetik yang mengatur stabilitas ekspresi gen. Modifikasi histon, metilasi DNA, dan perubahan struktur kromatin terbukti berperan penting dalam mempertahankan pola ekspresi gen diferensiasi agar tetap konsisten pada generasi sel berikutnya. Studi nasional mengungkapkan bahwa perubahan epigenetik ini mendukung penyesuaian sel terhadap kondisi lingkungan tanpa mengubah urutan DNA, sehingga tanaman dapat mempertahankan kemampuan perkembangan jaringan secara adaptif (Dewi & Utami, 2021; Yuniarti et al., 2025). Proses-proses epigenetik ini juga berperan dalam menjaga ketahanan fungsi vaskular terhadap variasi lingkungan seperti cekaman air dan intensitas cahaya.

Berdasarkan berbagai temuan nasional tersebut, dapat dipahami bahwa diferensiasi sel tanaman bukan hanya dipengaruhi oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan hasil koordinasi antara sinyal hormon, regulasi molekuler, dan mekanisme epigenetik yang bekerja secara terpadu. Interaksi dinamis ketiga mekanisme tersebut memastikan pembentukan jaringan vaskular yang

terstruktur, stabil, dan berfungsi dengan baik untuk mendukung pertumbuhan tanaman dalam jangka panjang. Pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme ini juga memberikan peluang dalam pengembangan teknologi hortikultura dan agronomi yang lebih presisi, terutama dalam penguatan jaringan tanaman, peningkatan ketahanan, serta optimalisasi produktivitas pada berbagai jenis tanaman budidaya di Indonesia..

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (literature review) dengan tujuan mengkaji, menganalisis, serta menyintesis berbagai temuan ilmiah terkait pola diferensiasi sel tanaman, khususnya pada proses pembentukan jaringan vaskular dan regulasi gen pengatur perkembangan. Metode ini dilakukan melalui tahapan sistematis yang meliputi identifikasi topik, penelusuran sumber, seleksi literatur, analisis isi, serta penyusunan sintesis akhir. Penelusuran literatur dilakukan menggunakan database ilmiah seperti Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, dan JSTOR, dengan pencarian menggunakan kata

kunci: plant cell differentiation, vascular development, xylem and phloem differentiation, VND transcription factors, plant developmental genetics, and epigenetic regulation in plants. Kriteria pemilihan literatur mencakup: (1) artikel ilmiah yang diterbitkan dalam 10–20 tahun terakhir, (2) publikasi bereputasi yang memiliki DOI atau indeksasi jelas, (3) relevansi tinggi dengan topik diferensiasi sel tanaman, dan (4) menyediakan data empiris atau kajian teoretis yang mendukung pembahasan. Setelah proses seleksi, literatur yang memenuhi kriteria dianalisis menggunakan pendekatan tematik dengan cara mengelompokkan temuan berdasarkan aspek-aspek utama diferensiasi sel, yaitu pengaruh hormon tanaman, peran faktor transkripsi, pembentukan jaringan vaskular, serta mekanisme epigenetik. Analisis komparatif dilakukan untuk menemukan pola kesamaan, perbedaan, maupun perkembangan teori antar penelitian. Seluruh literatur yang digunakan kemudian disintesiskan untuk membangun pemahaman komprehensif mengenai dinamika diferensiasi sel tanaman. Dengan demikian, metode studi

literatur ini memberikan landasan teoretis yang kuat sekaligus merangkum kemajuan penelitian terkini dalam bidang biologi perkembangan tanaman.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Diferensiasi sel pada tanaman merupakan proses penting dalam pembentukan jaringan vaskular yang memungkinkan terjadinya transport air, mineral, serta hasil fotosintesis ke seluruh bagian tanaman. Proses ini diatur oleh interaksi antara hormon tanaman, aktivitas meristem sekunder (kambium), serta modifikasi struktur dinding sel. Kelima aspek ini bekerja secara sinergis untuk membentuk jaringan xilem dan floem yang kuat dan berfungsi optimal.

1. Peran Auksin dalam Pembentukan Xilem

Auksin adalah hormon pengatur tumbuh yang memiliki hubungan kuat dengan pembentukan xilem. Pemberian auksin dapat mempercepat pemanjangan sel, mendorong pembentukan elemen trachea, serta menstimulasi aktivitas kambium. Dalam beberapa penelitian nasional, auksin dilaporkan mampu meningkatkan ketebalan xilem, memperbaiki

kualitas dinding sel, serta memperkuat daya tahan mekanik batang.

Auksin juga mengatur pola diferensiasi sel dengan menciptakan gradien konsentrasi. Tanaman dengan kadar auksin tinggi pada daerah kambium menunjukkan perkembangan xilem yang lebih cepat dan teratur. Hal ini menjelaskan pentingnya auksin dalam menjaga keseimbangan antara pertumbuhan longitudinal dan radial tanaman.

Table 1 Efek Auksin terhadap Pembentukan Xilem

Tanaman	Perlakuan Auksin	Dampak pada Xilem	Sumber
Sengon	IAA 1–2 mg/L	Jumlah xilem meningkat	Putra et al. (2021)
Kayutropis	Auksin tinggi	Aktivitas kambium meningkat	Ananta & Lestari (2021)
Tanaman tahanan	Auksin dalam kultur	Sel xilem memanjang	Fitriani & Yuliana (2022)
Mahoni	Auksin alami	Dinding xilem lebih kuat	Yuniarti et al. (2025)

2. Peran Sitokinin dalam Pembentukan Floem
Sitokinin merupakan hormon yang berperan langsung dalam pembelahan sel dan pembentukan floem. Floem yang terbentuk dengan baik memungkinkan pengangkutan hasil fotosintesis secara efisien. Sitokinin bekerja dengan merangsang pembelahan sel pada daerah kambium dan mempengaruhi arah diferensiasi menuju floem.

Penelitian nasional melaporkan bahwa peningkatan sitokinin mampu mempercepat pembentukan floem primer, meningkatkan kerapatan sel-sel floem, dan memperkuat jaringan pengangkut. Kombinasi antara sitokinin dan auksin terbukti menghasilkan pembentukan jaringan vaskular yang lebih seimbang, baik secara struktural maupun fungsional.

Table 2 Efek Sitokinin terhadap Pembentukan Floem

Tanaman	Perlakuan Sitokinin	Dampak	Sumber
Kultur pisang	0,5–1 mg/L BAP	Floem primer meningkat	Ardiyanti & Prasetyo (2020)

Perkebunan	Sitokinina meningkat	Aktivitas floem naik	Anggraeni et al. (2022)
Tahanan	Sitokinina alami	Kerapatan floem meningkat	Sari & Permatas (2024)
Hortikultura	Sitokinina eksogen	Pembentukan floem lebih cepat	Suhadi & Ekawati (2020)

3. Regulasi Gen Dasar dalam Diferensiasi Xilem dan Floem

Kambium adalah jaringan meristem sekunder yang membentuk xilem dan floem secara berkelanjutan. Aktivitasnya dipengaruhi oleh faktor internal seperti umur tanaman dan ketersediaan hormon, serta faktor eksternal seperti musim, suhu, dan ketersediaan air.

Penelitian menunjukkan bahwa aktivitas kambium yang tinggi dapat meningkatkan jumlah xilem dan floem yang dibentuk, sehingga memperkuat sistem transport tanaman. Pada kondisi lingkungan yang mendukung, kambium dapat menghasilkan pembentukan jaringan vaskular dengan pola yang lebih teratur, meningkatkan ketahanan tumbuhan terhadap tekanan lingkungan.

Table 3 Aktivitas Kambium pada Tanaman

Gen / Indikator	Perubahan	Kondisi	Sumber
Penanda xilem (IRX)	Meningkat 4–9x	Auksin tinggi	Yamaguchi et al. (2010)
Penanda floem (APL)	Menurun 70–90%	Mutasi	Bonke et al. (2003)
Penanda awal vaskular (ATHB8)	Naik 2–3x	IAA 1 μ M	Hardtke & Berleth

4. Peran Brassinosteroid dalam Lignifikasi

Brassinosteroid (BR) berfungsi meningkatkan lignifikasi, yaitu proses penguatan dinding sel yang sangat penting dalam diferensiasi xilem. Lignifikasi meningkatkan kekakuan dinding sel dan ketahanannya, sehingga mendukung fungsi mekanik batang dan efisiensi transport air.

Beberapa laporan penelitian lokal menyebutkan bahwa aplikasi BR pada tanaman berkayu dapat meningkatkan kadar lignin dan mempercepat pembentukan dinding sekunder. Hal ini memberikan kontribusi langsung terhadap kualitas elemen xilem dalam mendukung struktur dan pertumbuhan tanaman.

Table 4 Pengaruh BR terhadap Lignifikasi

Tanaman	Peran BR	Efek	Sumber
Tanaman berkarbon	Meningkatkan lignin	Xilem lebih keras	Larasati & Anggraini (2020)
Tahanan	BR + faktor internal	Penebalan dinding sel	Triana et al. (2023)
Hortikultura	BR moderat	Lignifikasi meningkat	Dewi & Utami (2021)
Kehutanan	BR tinggi	Jaringan pembuluh lebih kuat	Yuniarti et al. (2025)

5. Peran Epigenetik

Perubahan dinding sel merupakan aspek penting dalam proses diferensiasi xilem. Selama perkembangan, terjadi peningkatan lignin, selulosa, dan hemiselulosa yang semuanya berperan memperkokoh sistem pengangkutan air. Dinding sel yang menebal memastikan elemen trachea tidak mudah runtuh saat tekanan air meningkat.

Selain itu, peningkatan lignifikasi juga berhubungan dengan ketahanan tanaman terhadap kondisi lingkungan yang berat. Hal ini memperlihatkan bahwa

diferensiasi tidak hanya berkaitan dengan fungsi transport, tetapi juga ketahanan mekanik.

Table 5 Perubahan Dinding Sel selama Diferensiasi

Indikator	Perubahan	Sumber	Indikator
Ketebalan dinding sel	Meningkat signifikan	Triana et al. (2023)	Ketebalan dinding sel
Lignin	Bertambah	Larasati & Anggraini (2020)	Lignin
Selulosa & hemiselulosa	Meningkat	Dewi & Utami (2021)	Selulosa & hemiselulosa
Kekuatannya mekanik	Meningkat	Yuniarti et al. (2025)	Kekuatannya mekanik

Perkembangan penelitian terbaru menunjukkan bahwa diferensiasi sel tanaman tidak hanya dikendalikan oleh hormon utama seperti auksin dan sitokin, tetapi juga oleh interaksi kompleks dengan hormon lain seperti giberelin, asam absisat (ABA), dan etilen. Giberelin, misalnya, terbukti berperan dalam proses pemanjangan sel dan

akumulasi lignin pada fase akhir diferensiasi xilem. Penelitian oleh Rahmawati et al. (2024) menjelaskan bahwa aplikasi giberelin pada tanaman berkayu meningkatkan efisiensi transport air melalui peningkatan ukuran lumen sel trachea, sehingga jaringan pembuluh menjadi lebih efektif dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Selain hormon, faktor lingkungan juga memiliki pengaruh besar terhadap diferensiasi jaringan vaskular. Cahaya, suhu, dan ketersediaan air diketahui memicu perubahan pola ekspresi gen yang menentukan arah perkembangan jaringan. Tanaman yang mengalami cekaman kekeringan, misalnya, menunjukkan peningkatan ekspresi gen-gen pembentuk xilem sebagai bentuk adaptasi untuk meningkatkan efisiensi transport air. Sebaliknya, pada kondisi lingkungan lembap, diferensiasi floem cenderung lebih dominan guna mendukung proses translokasi hasil fotosintesis ke seluruh bagian tanaman.

Dari sisi bioteknologi, rekayasa genetika terhadap faktor transkripsi seperti VND, MYB, dan NAC telah menunjukkan potensi besar dalam

mengontrol pembentukan jaringan vaskular. Manipulasi ekspresi gen VND6 dan VND7, misalnya, dapat mempercepat pembentukan elemen trachea xilem dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman mekanik maupun lingkungan. Hal ini membuka peluang besar dalam pengembangan varietas tanaman budidaya yang lebih adaptif dan memiliki efisiensi fisiologis yang lebih baik.

Selain itu, studi epigenetik terbaru mengungkap bahwa beberapa modifikasi histon seperti H3K4me3 dan H3K27me1 berperan penting dalam mengunci status diferensiasi sel sehingga perubahan-perubahan tersebut dapat diwariskan ke generasi sel berikutnya tanpa mengubah susunan DNA. Mekanisme epigenetik ini memastikan bahwa pola perkembangan jaringan vaskular tetap konsisten, meskipun tanaman menghadapi variasi lingkungan yang dinamis. Penelitian nasional juga menunjukkan bahwa perubahan epigenetik berperan dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik seperti salinitas dan suhu tinggi.

Interaksi antara regulasi hormonal, faktor transkripsi, dan mekanisme

epigenetik menggambarkan bahwa diferensiasi sel tanaman merupakan proses multidimensi yang sangat terkoordinasi. Pemahaman terhadap ketiga aspek utama ini memberikan wawasan penting dalam pengembangan teknologi agronomi modern, termasuk kultur jaringan, rekayasa genetika, dan peningkatan kualitas tanaman budidaya. Dengan pemahaman mendalam mengenai proses diferensiasi, langkah-langkah spesifik dapat dirancang untuk meningkatkan ketahanan, produktivitas, serta adaptasi tanaman terhadap perubahan iklim global.

D. Kesimpulan

Diferensiasi sel tanaman merupakan proses kompleks yang dipengaruhi oleh interaksi hormon, aktivitas kambium, dan perubahan struktural pada dinding sel. Auksin berperan penting dalam mengarahkan pembentukan xilem melalui peningkatan aktivitas kambium dan penguatan dinding sel. Sitokinin memberikan kontribusi besar terhadap pembentukan floem melalui stimulasi pembelahan sel dan pematangan jaringan pengangkut. Aktivitas kambium yang responsif terhadap hormon dan lingkungan

memungkinkan pembentukan jaringan vaskular berlangsung secara optimal. Brassinosteroid memperkuat proses lignifikasi, sehingga meningkatkan kekuatan mekanik elemen pembuluh. Perubahan dinding sel, termasuk peningkatan lignin, selulosa, dan hemiselulosa, menjadi penanda utama keberhasilan diferensiasi xilem. Secara keseluruhan, pembentukan jaringan vaskular tanaman merupakan hasil integrasi beberapa mekanisme biologis yang bekerja secara sinergis untuk menghasilkan sistem transport internal yang stabil, kuat, dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Ananta, G., & Lestari, W. (2021). Peran auksin dalam pembentukan jaringan vaskular tanaman kayu tropis. *Jurnal Biologi Indonesia*, 17(2), 101–112.
- Anggraeni, P., et al. (2022). Regulasi pertumbuhan kambium dan pembentukan xilem pada tanaman perkebunan. *Jurnal Agroteknologi Indonesia*, 11(1), 45–54.
- Ardiyanti, S., & Prasetyo, B. (2020). Respons jaringan tanaman terhadap aplikasi sitokinin dalam kultur *in vitro*. *Jurnal Kultur Tanaman Indonesia*, 9(3), 137–145.
- Dewi, M., & Utami, R. (2021). Diferensiasi sel dan pembentukan pembuluh pada tanaman tropis.

- Jurnal Sains dan Lingkungan, 13(1), 55–64.
- Fitriani, S., & Yuliana, D. (2022). Pengaruh hormon auksin dan sitokinin terhadap perkembangan jaringan pembuluh tanaman. *Jurnal Biologi Tropis*, 20(1), 12–22.
- Hadi, K., & Cahyono, S. (2023). Pola perkembangan xilem dan floem pada tanaman kehutanan Indonesia. *Jurnal Penelitian Kehutanan Tropika*, 25(2), 89–98.
- Handayani, T., & Firmansyah, A. (2024). Pengaruh kondisi fisiologis tanaman terhadap aktivitas kambium. *Jurnal Agroforestri Nusantara*, 7(1), 48–57.
- Larasati, R., & Anggraini, N. (2020). Peranan brassinosteroid pada proses lignifikasi tanaman berkayu. *Jurnal AgroBiogen Indonesia*, 18(4), 251–260.
- Marbun, L., et al. (2023). Mekanisme pembentukan jaringan pengangkut pada tanaman hortikultura. *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 14(2), 122–132.
- Putra, A., et al. (2021). Pengaruh auksin terhadap pembentukan xilem pada kultur batang sengon. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 10(1), 24–33.
- Ramadhani, S., et al. (2023). Regulasi hormon pertumbuhan dalam pembentukan floem tanaman tahunan. *Jurnal Botani Tropika*, 7(2), 66–78.
- Sari, D., & Permata, L. (2024). Aktivitas hormon tanaman dalam proses diferensiasi jaringan pada tanaman tahunan. *Jurnal Sains Pertanian Indonesia*, 9(1), 33–42.
- Suhadi, M., & Ekawati, P. (2020). Dinamika perkembangan jaringan floem pada tanaman tropis. *Jurnal Biologi dan Lingkungan*, 9(2), 78–88.
- Triana, F., et al. (2023). Perubahan struktur dinding sel selama pembentukan jaringan pembuluh. *Jurnal Fisiologi Tumbuhan Indonesia*, 4(1), 41–51.
- Yuniarti, R., et al. (2025). Studi perkembangan jaringan vaskular pada tanaman budidaya. *Jurnal Bioteknologi & Pertanian Modern*, 5(1), 14–27.