

HOMEOSTASIS SEL PUNCA DAN PEMBELAHAN SEL PADA MERISTEM TUMBUHAN: TINJAUAN KOMPREHENSIF JALUR REGULASI

Dwi Ariani¹, Wan Syafi'i²

^{1,2}Program Magister Pendidikan Biologi, FKIP, Universitas Riau

¹dwi.ariani1655@grad.unri.ac.id, ²wan.wsyafii@lecturer.unri.ac.id

ABSTRACT

Meristems in plants, including the shoot apical meristem (SAM), root apical meristem (RAM), and cambium, maintain a balance between stem cell proliferation and differentiation to support the growth of new organs. This article aims to review recent literature (2024–2026) on meristem organization and the regulation of cell division rates in plant roots and shoots. The methodology employed is a systematic literature review of 10 relevant journals, comprising experimental studies and review articles focusing on genetic pathways (WUS-CLV3, WOX5-CLE, TDIF-PXY), transcription factors (WUS, WOX5, KNOX, PLT, NAC, MYB), hormonal regulation (auxin, cytokinin, brassinosteroids, ethylene), epigenetics, cellular mechanics, and metabolism. The analysis shows that stem cell homeostasis is achieved through the integration of genetic feedback loops, hormonal cross-talk, epigenetic regulation, and mechanical regulation, which together control proliferation, differentiation, the orientation of symmetric and asymmetric cell division, and intercellular communication through plasmodesmata and the extracellular matrix. Metabolic and redox status also support meristem adaptation to environmental conditions. These findings provide a holistic overview of meristem regulatory mechanisms in plants and serve as a conceptual foundation for further research, crop improvement, and a deeper understanding of organogenesis.

Keywords: *Plant Meristem, Stem Cell Maintenance, Cell Division*

ABSTRAK

Meristem pada tumbuhan, termasuk shoot apical meristem (SAM), root apical meristem (RAM), dan cambium, mempertahankan keseimbangan antara proliferasi sel punca dan diferensiasi untuk mendukung pertumbuhan organ baru. Tujuan artikel ini adalah meninjau literatur terbaru (2024–2026) mengenai organisasi meristem dan regulasi laju pembelahan sel pada akar dan tunas tumbuhan. Metodologi yang digunakan adalah studi literatur sistematis terhadap 10 jurnal yang relevan, mencakup penelitian eksperimental dan review dengan fokus pada jalur genetik (WUS-CLV3, WOX5-CLE, TDIF-PXY), faktor transkripsi (WUS, WOX5, KNOX, PLT, NAC, MYB), regulasi hormonal (auxin, cytokinin, brassinosteroid, ethylene), epigenetik, mekanika sel, dan metabolisme. Hasil analisis menunjukkan bahwa homeostasis sel punca dicapai melalui integrasi feedback loop genetik, cross-talk hormonal, epigenetik, dan mekanik, yang mengatur proliferasi, diferensiasi, orientasi pembelahan sel simetris dan asimetris, serta komunikasi antar-sel melalui plasmodesmata dan extracellular matrix. Status metabolik dan redox juga mendukung adaptasi meristem terhadap kondisi lingkungan. Temuan ini memberikan gambaran holistik mekanisme regulasi

meristem pada tumbuhan dan menjadi landasan konseptual untuk penelitian lanjutan, perbaikan tanaman, dan pemahaman organogenesis.

Kata Kunci: Meristem Tumbuhan, Stem Cell Maintenance, Pembelahan Sel

A. Pendahuluan

Tumbuhan memiliki kemampuan unik untuk terus menghasilkan organ baru sepanjang siklus hidupnya melalui jaringan meristem, termasuk shoot apical meristem (SAM), root apical meristem (RAM), dan cambium (Putri & Syafi'i, 2025). Menurut Muttaqin (2023), meristem ini menyimpan sel punca yang mempertahankan kapasitas self-renewal sekaligus menghasilkan sel diferensiasi untuk membentuk daun, akar, bunga, dan jaringan sekunder. Fenomena ini mencerminkan plasticity perkembangan tumbuhan yang memungkinkan adaptasi terhadap perubahan lingkungan dan kebutuhan fisiologis secara berkelanjutan.

Keseimbangan antara proliferasi dan diferensiasi sel punca sangat sensitif terhadap gangguan, baik dari faktor internal maupun eksternal. Faktor internal meliputi mutasi genetik, distribusi hormon yang tidak merata, dan modifikasi epigenetik, sedangkan faktor eksternal mencakup tekanan mekanik, stres

lingkungan, dan perubahan nutrisi (Mailidarni & Djafar, 2025). Kondisi ini menimbulkan pertanyaan mengenai bagaimana meristem dapat mempertahankan stem cell pool sambil tetap menghasilkan sel diferensiasi yang optimal.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa homeostasis meristem dikendalikan oleh feedback loop genetik, seperti WUS-CLV3 di SAM, WOX5-CLE di RAM, dan TDIF-PXY di cambium (Shpak & Uzair, 2025). Selain itu, transcriptional networks yang melibatkan KNOX, PLT, NAC, dan MYB, serta modulasi hormonal seperti auxin, cytokinin, brassinosteroid, dan ethylene, memainkan peran penting. Menurut Schraivogel et al. (2022), data dari single-cell RNA sequencing, spatial transcriptomics, dan live imaging mengungkap heterogenitas sel dan pola pembelahan sel simetris maupun asimetris yang presisi, mendukung teori integrasi multi-level dalam pengaturan meristem.

Studi eksperimental terbaru juga menyoroti peran mekanika sel,

plasmodesmata, dan extracellular matrix dalam mengatur orientasi pembelahan dan distribusi faktor regulasi (Aryani, 2025). Kurniawan & Maulidah (2026) mengemukakan bahwa status metabolik dan redox juga berkontribusi pada laju proliferasi sel serta kapasitas adaptasi meristem terhadap lingkungan. Gabungan bukti ini menunjukkan bahwa homeostasis meristem merupakan hasil integrasi genetik, hormonal, epigenetik, metabolik, dan mekanik.

Fokus utama artikel ini adalah menganalisis organisasi meristem dan regulasi laju pembelahan sel pada akar dan tunas tumbuhan berdasarkan literatur terbaru (2024–2026). Tujuan penelitian ini adalah menyajikan pemahaman komprehensif mengenai mekanisme pengaturan stem cell, pola pembelahan simetris dan asimetris, serta adaptasi meristem terhadap kondisi lingkungan, sekaligus menyoroti interaksi multi-level yang masih belum sepenuhnya dipahami.

Manfaat penelitian ini mencakup penyediaan landasan konseptual bagi penelitian lanjutan dalam organogenesis dan perbaikan tanaman, serta pemahaman

mekanisme adaptasi fisiologis meristem terhadap perubahan lingkungan. Dengan merangkum temuan terbaru dari 10 jurnal literatur, artikel ini diharapkan memberikan pandangan holistik mengenai regulasi stem cell dan pembelahan sel pada meristem tumbuhan, yang dapat menjadi referensi penting bagi akademisi dan praktisi pertanian modern.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis untuk menganalisis mekanisme regulasi meristem dan laju pembelahan sel pada akar dan tunas tumbuhan. Proses seleksi literatur dilakukan melalui pencarian di database akademik utama, termasuk Scopus, Web of Science, PubMed, Google Scholar, dan jurnal open access. Kata kunci yang digunakan mencakup kombinasi istilah: plant meristem, shoot apical meristem, root apical meristem, stem cell maintenance, cell division, transcriptional regulation, hormonal regulation, epigenetic regulation, dan mechanical regulation.

Artikel yang disertakan memenuhi kriteria: diterbitkan dalam

5 tahun terakhir (2024–2026), ditulis dalam bahasa Inggris atau Indonesia, fokus pada mekanisme molekuler dan seluler meristem, serta berasal dari penelitian eksperimental atau review yang peer-reviewed. Artikel yang hanya membahas hasil perkembangan tanpa mekanisme molekuler, atau yang meneliti jaringan terdiferensiasi, tidak dimasukkan.

Tahap awal penelitian melibatkan identifikasi dan screening judul serta abstrak dari ratusan artikel, diikuti dengan pemeriksaan full text untuk memastikan relevansi terhadap fokus penelitian. Dari proses ini, dipilih 10 artikel sebagai literatur utama yang mencakup SAM, RAM, dan cambium, serta aspek regulasi genetik, hormonal, epigenetik, mekanik, dan metabolik.

Data dari setiap artikel kemudian diekstraksi dan dikategorikan berdasarkan fokus penelitian, metode yang digunakan, dan temuan utama. Kategori tersebut meliputi: feedback loop genetik, transcriptional networks, regulasi hormonal, epigenetik, metabolisme dan redox, serta mekanika dan komunikasi seluler.

Analisis dilakukan secara deskriptif dan tematik, merangkum kesamaan, perbedaan, dan integrasi antar mekanisme pada berbagai tipe meristem. Pendekatan ini memungkinkan pemetaan pola regulasi homeostasis sel punca dan orientasi pembelahan sel, sekaligus mengidentifikasi research gap yang relevan untuk penelitian lanjutan.

C.Hasil Penelitian dan Pembahasan

1. Hasil

Meristem pada tumbuhan, baik shoot apical meristem (SAM) maupun root apical meristem (RAM), mempertahankan keseimbangan antara proliferasi sel dan diferensiasi melalui jaringan regulasi yang kompleks (Pulungan & Syafi'i, 2025). Berdasarkan literatur terbaru (2024–2026), stem cell meristem di SAM, RAM, dan cambium dikendalikan oleh kombinasi mekanisme genetik, hormonal, epigenetik, serta mekanik.

Faktor transkripsi seperti WUS, WOX5, KNOX, PLT, NAC, dan MYB berinteraksi dengan sinyal hormonal (auxin, cytokinin, brassinosteroid, ethylene) untuk menentukan jumlah sel punca dan arah diferensiasi (Salsabilah & Syafli, 2025). Selain itu,

komunikasi antar-sel melalui plasmodesmata dan extracellular matrix memastikan distribusi faktor regulasi yang presisi.

Teknologi modern seperti single-cell RNA sequencing, spatial transcriptomics, 3D imaging, live-cell imaging, dan computational modeling memungkinkan identifikasi heterogenitas seluler dan jalur regulasi yang sebelumnya sulit dipetakan.

Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa orientasi pembelahan sel simetris dan asimetris diatur oleh integrasi sinyal internal (genetik, epigenetik) dan eksternal (hormonal, mekanik) sehingga homeostasis meristem tetap terjaga. Hasil artikel literatur yang dianalisis, mencakup fokus, relevansi, dan temuan utama tiap studi seperti berikut ini:

Tabel 1. Ringkasan Studi Literatur Terkait Organisasi Meristem dan Regulasi Pembelahan Sel pada Akar dan Tunas Tumbuhan (2024–2026)

No	Judul Artikel dan Penulis	Jurnal	Temuan Utama
1	De novo organogenesis & cell fate reprogramming – Nath et al., 2025	Molecular Biology Reports	Menunjukkan mekanisme ACD dan SCD, regulasi pola meristem, stem cell maintenance
2	De novo flower organogenesis & meristem initiation – Peeters et al., 2026	Frontiers in Plant Science	Highlight signaling networks dan pola pembelahan sel saat inisiasi organ floral
3	Actin cytoskeleton & division orientation in root epidermis – Goldy et al., 2026	Science Advances	Cytoskeleton mengatur orientasi pembelahan asimetris, memengaruhi diferensiasi sel
4	3D imaging & rice embryogenesis – Tezuka et al., 2026	Plant Cell	Visualisasi pola pembelahan sel dan orientasi bidang pembelahan selama pembentukan meristem
5	Molecular regulation of asymmetric cell division in dicots – Chowdhury et al., 2026	Molecular Biology Reports	Intrinsic & extrinsic cues mengontrol pembelahan asimetris, regulasi fate daughter cells
6	Cell fate determination during sexual plant reproduction – Huang & Sun, 2024	New Phytologist	Determinasi sel di gametogenesis dan awal embrio, pengaruh sinyal posisi & faktor transkripsi
7	Single-cell RNA sequencing reveals ZmEREB14 affecting SAM – Ma et al., 2024	Plant Biotechnology Journal	Identifikasi faktor transkripsi ZmEREB14 sebagai regulator SAM dan organogenesis
8	Auxin–cytokinin crosstalk in carpel initiation – Kwiatkowska & Borowska-Wykręć, 2026	Journal of Experimental Botany	Crosstalk auxin–cytokinin menentukan proliferasi sel dan pembentukan organ floral

9	WUSCHEL: The essential regulator of the Arabidopsis SAM – Shpak & Uzair, 2025	Current Opinion in Plant Biology	Crosstalk auxin–cytokinin menentukan proliferasi sel dan pembentukan organ floral
10	Molecular and cellular mechanisms of stem cell maintenance in plant meristems – Awanda Prasono & Wan Syafi'i, 2025	Bio-Lectura	Review komprehensif: pathways, TFs, epigenetik, hormonal, metabolik, mekanika sel, plasmodesmata

Hasil literatur ini menunjukkan keseragaman prinsip regulasi di berbagai tipe meristem. Homeostasis sel punca dicapai melalui feedback loop genetik dan hormonal, integrasi epigenetik, serta kontrol mekanik dan komunikasi seluler. Aktivitas proliferasi sel ditentukan oleh orientasi pembelahan sel, polaritas, dan sinyal hormonal lokal, yang menghasilkan pola distribusi sel simetris dan asimetris untuk mempertahankan pool sel punca sekaligus menghasilkan sel diferensiasi.

Selain itu, kombinasi teknologi modern mengungkap heterogenitas seluler dan transisi fase pembelahan dengan resolusi tinggi. Data dari scRNA-seq dan spatial transcriptomics mengonfirmasi perbedaan status sel dalam meristem, sedangkan live-cell imaging dan model komputasional memetakan jalur regulasi kompleks yang menghubungkan faktor genetik,

hormonal, dan mekanik. Integrasi ini membentuk kerangka kerja konseptual yang lengkap untuk memahami homeostasis meristem pada tanaman modern.

2. Pembahasan

a. Peran WUS/WOX5 dan Jalur Genetik

WUS di SAM dan WOX5 di RAM merupakan regulator inti stem cell. Umpan balik negatif dari CLV3 dan interaksi dengan transcription factors lain menjaga jumlah sel punca (Prasono, 2025). Literatur terbaru menegaskan bahwa post-translational modification dan mobilitas antar-sel WUS/WOX5 memodulasi aktivitas mereka, sehingga homeostasis meristem tetap terjaga meski terjadi fluktuasi hormonal atau mekanik .

b. Signaling Hormonal dan Crosstalk

Auxin dan cytokinin berperan antagonis tetapi saling melengkapi untuk menentukan proliferasi dan

diferensiasi sel. Brassinosteroid, ethylene, dan gibberellin menambah lapisan regulasi, memungkinkan adaptasi meristem terhadap lingkungan (Triati et al., 2026). Studi Kwiatkowska & Borowska-Wykręć (2026) menyoroti pentingnya crosstalk hormon pada inisiasi karpel sebagai model integrasi hormonal.

c. Orientasi dan Jenis Pembelahan Sel

Pembelahan simetris memperluas jumlah sel punca, sedangkan asimetris menentukan sel diferensiasi. Integrasi sinyal intrinsik (faktor genetik, polaritas) dan ekstrinsik (hormon, mekanik) menentukan posisi bidang pembelahan (Ramadhani & Syafi'i, 2025). ACD pada stomata, lateral root, dan shoot organogenesis menunjukkan konservasi mekanisme across meristem types .

d. Epigenetik dan Transcriptional Network

Chromatin remodeling, histone modification, dan non-coding RNA membentuk lingkungan epigenetik permissif untuk ekspresi gen sel punca, sekaligus menekan ekspresi gen diferensiasi prematur (Karim, 2017). Transcription factors KNOX, NAC, MYB, PLT berperan menjaga

identitas sel punca sambil merespons sinyal hormonal dan mekanik .

e. Mekanika Sel dan Komunikasi Seluler

Mechanical forces, plasmodesmata, dan extracellular matrix berperan dalam pengaturan orientasi pembelahan dan distribusi sinyal (Ilahi & Syafii, 2026). Variasi stiffness jaringan, tekanan mekanik, dan integrasi sinyal plasmodesmata memungkinkan pola spasial yang presisi untuk homeostasis sel punca, terutama di cambium dan SAM .

f. Metabolisme dan Redox

Glukosa, T6P, dan ROS memainkan peran sebagai sinyal metabolik yang mengatur proliferasi sel dan stabilitas sel punca (Ainun, 2025). Meristem mampu beradaptasi terhadap kondisi lingkungan dengan mengubah status redox dan jalur metabolik, mendukung ketahanan stem cell pool dan fleksibilitas organogenesis.

D. Kesimpulan

Berdasarkan analisis literatur terbaru (2024–2026), regulasi meristem pada tumbuhan, baik shoot apical meristem (SAM), root apical meristem (RAM), maupun cambium, dikendalikan melalui integrasi multi-

level yang melibatkan feedback loop genetik, transcriptional networks, regulasi hormonal, modulasi epigenetik, mekanika sel, dan metabolisme.

Homeostasis stem cell tercapai melalui pembelahan sel simetris yang memperluas jumlah sel punca dan pembelahan sel asimetris yang menghasilkan sel diferensiasi, mendukung pembentukan organ baru serta adaptasi terhadap kondisi lingkungan. Orientasi bidang pembelahan sel, komunikasi antar-sel, status metabolik, dan sinyal hormonal menjadi faktor utama dalam menjaga pola proliferasi dan diferensiasi meristem.

Meskipun temuan dari literatur menunjukkan pemahaman yang mendalam tentang mekanisme molekuler dan seluler meristem, terdapat beberapa kekurangan dan potensi penelitian lanjutan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memetakan integrasi multi-level secara real-time, termasuk dinamika temporal dan spasial sel punca, hubungan mekanika jaringan dengan ekspresi gen, regulasi metabolik, serta respons meristem terhadap kondisi lingkungan nyata.

Selain itu, pengembangan kombinasi teknologi modern seperti single-cell RNA sequencing, spatial transcriptomics, live imaging, dan computational modeling dapat memperdalam pemahaman jalur regulasi yang kompleks.

Dengan demikian, artikel ini tidak hanya menyajikan pemahaman holistik mengenai organisasi meristem dan regulasi pembelahan sel, tetapi juga menjadi dasar bagi penelitian lanjutan untuk optimalisasi pertumbuhan tanaman, peningkatan organogenesis, dan strategi adaptasi fisiologis meristem dalam konteks agronomi dan bioteknologi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ainun, NA (2025). ILMU BIOLOGI DASAR. Ilmu Biologi Dasar , 46.
- Aryani, R. D (2025). Struktur dan Fungsi Sel Tanaman. Fisiologi Tumbuhan , 13.
- Chowdhury, R., et al. (2026). Molecular regulation of asymmetric cell division in dicots. Molecular Biology Reports.
- Goldy, L., et al. (2026). Actin cytoskeleton & division orientation in root epidermis. Science Advances.
- Huang, Y., & Sun, X. (2024). Cell fate determination during sexual plant reproduction. New Phytologist.
- Ilahi, RNK, & Syafii, W. (2026). Pengaruh Arah Distribusi Auksin terhadap Pola Pembentukan Primordium Daun pada

- Arabidopsis. Botani: Publikasi Ilmu Tanaman dan Agribisnis , 3 (1), 31-36.
- Karim, M. R (2017). Ekspresi Gen dan Metilasi DNA Selama Kultur In Vitro dan Regenerasi Tanaman pada Boesenbergia Rotunda (L.) Mansf (Disertasi Doktoral, Universitas Malaya (Malaysia)).
- Kurniawan, A., & Maulidah, NI (2026). *Fitohormon: Regularor Pertumbuhan Tanaman*. Pers Universitas Brawijaya.
- Kwiatkowska, D., & Borowska-Wykręć, D. (2026). Auxin–cytokinin crosstalk in carpel initiation. *Journal of Experimental Botany*.
- Ma, L., et al. (2024). Single-cell RNA sequencing reveals ZmEREB14 affecting SAM. *Plant Biotechnology Journal*.
- Mailidarni, N., & Djafar, T. (2025). Fisiologi tumbuhan: Proses, mekanisme, dan adaptasi . Penerbit Media Elfarazy.
- Nath, A., et al. (2025). De novo organogenesis & cell fate reprogramming. *Molecular Biology Reports*.
- Peeters, J., et al. (2026). De novo flower organogenesis & meristem initiation. *Frontiers in Plant Science*.
- Prasono, A. (2025). Mekanisme Molekuler dan Seluler Pemeliharaan Sel Stem pada Meristem Tumbuhan: TINJAUAN PUSTAKA. *Bio-Lectura: Jurnal Pendidikan Biologi* , 12 (1), 110-126.
- Prasono, A., & Syafi'i, W. (2025). Molecular and cellular mechanisms of stem cell maintenance in plant meristems: A literature review. *Bio-Lectura: Jurnal Pendidikan Biologi*, 12(1), 110–126.
- Pulungan, NA, & Syafi'i, W. (2025). Struktur Perkembangan Dasar Tumbuhan: Studi Embriogenesis pada Embrio Arabidopsis. *Pendas: Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar* , 10 (04), 360-369.
- Putri, Z. A., & Syafi'i, W. (2025). Literature Study on the Structural Adaptation of Meristematic Tissues During Primary Growth of Roots and Stems. *Pendas: Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar*, 10(04), 130-140.
- Ramadhani, S., & Syafi'i, W. (2025). Permasalahan dan Pola Dalam Perkembangan Struktur Dasar Selama Embriogenesis Tumbuhan. *Pendas: Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar* , 10 (04), 100-106.
- Salsabilah, CI, & Syafli, W. (2025). Dinamika Diferensiasi Sel Tanaman: Dari Pembentukan Jaringan Vaskular Hingga Ekspresi Gen Pengatur Perkembangan. *Pendas: Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar* , 10 (04), 489-498.
- Schraivogel, D., Kuhn, TM, Rauscher, B., Rodríguez-Martínez, M., Paulsen, M., Owsley, K., ... & Steinmetz, LM (2022). Penyortiran sel berkecepatan tinggi yang diaktifkan oleh citra fluoresensi. *Science* , 375 (6578), 315-320.
- Shpak, E. D., & Uzair, M. (2025). WUSCHEL: The essential regulator of the Arabidopsis SAM. *Current Opinion in Plant Biology*.
- Shpak, ED, & Uzair, M. (2025). WUSCHEL: Regulator penting dari meristem apikal tunas Arabidopsis. *Current Opinion in Plant Biology*.
- Tezuka, H., et al. (2026). 3D imaging & rice embryogenesis. *Plant Cell*.
- Triati, D., Kilkoda, AK, Latuponu, H., Hulopi, F., Trisnaningrum, N., Sulistiyani, A., & Habibah, P. (2026). *Fisiologi Tumbuhan* . CV. Akademi Pendidikan.