



Pengaruh Arah Distribusi Auksin terhadap Pola Pembentukan Primordium Daun pada Arabidopsis

Rizky Nanda Kurnia Ilahi^{1*}, Wan Syafii²

¹⁻²Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Riau, Indonesia

*Penulis Korespondensi: rizky.nanda6052@grad.unri.ac.id

Abstract. *This literature review synthesizes a wide range of research findings that examine the role of auxin distribution direction in regulating leaf primordium patterning, known as phyllotaxis, in Arabidopsis thaliana. The reviewed studies consistently indicate that phyllotaxis represents a highly coordinated growth regulation mechanism that is primarily governed by Polar Auxin Transport (PAT), which is mediated by Pin-Formed (PIN) auxin efflux proteins. The polarity and spatial localization of PIN proteins generate dynamic auxin gradients within the shoot apical meristem, and these gradients function as key positional signals that determine the precise sites where new leaf primordia are initiated. Furthermore, auxin distribution is not regulated solely by PAT but is tightly integrated with genetic, cellular, and mechanical cues. Several studies highlight the role of transcription factors such as TMO5 in influencing PIN1 convergence and reinforcing auxin maxima at primordium initiation sites. In addition, the interaction between PIN polarity and the orientation of cortical microtubules suggests that mechanical stress and cytoskeletal organization contribute to the stability and directionality of auxin flow. Comparative analysis of the literature demonstrates that PAT and PIN proteins operate through interconnected mechanisms to control auxin distribution direction, which ultimately shapes the spatial arrangement and regularity of leaf primordium patterns. Overall, this review emphasizes the complexity and integration of hormonal, genetic, and mechanical signals in controlling phyllotaxis in plants.*

Keywords: Arabidopsis; Auxin; Phyllotaxis; PIN; Polarity.

Abstrak. Tinjauan literatur ini mensintesis berbagai temuan penelitian yang mengkaji peran arah distribusi auksin dalam mengatur pola primordia daun, yang dikenal sebagai filotaksis, pada Arabidopsis thaliana. Studi-studi yang ditinjau secara konsisten menunjukkan bahwa filotaksis merupakan mekanisme pengaturan pertumbuhan yang sangat terkoordinasi yang terutama diatur oleh Transportasi Auksin Polar (PAT), yang dimediasi oleh protein auksin Pin-Formed (PIN). Polaritas dan lokalisasi spasial protein PIN menghasilkan gradien auksin dinamis di dalam meristem apikal pucuk, dan gradien ini berfungsi sebagai sinyal posisi kunci yang menentukan lokasi tepat di mana primordia daun baru diinisiasi. Lebih lanjut, distribusi auksin tidak hanya diatur oleh PAT tetapi terintegrasi erat dengan isyarat genetik, seluler, dan mekanis. Beberapa studi menyoroti peran faktor transkripsi seperti TMO5 dalam memengaruhi konvergensi PIN1 dan memperkuat maksimum auksin di lokasi inisiasi primordia. Selain itu, interaksi antara polaritas PIN dan orientasi mikrotubulus kortikal menunjukkan bahwa tekanan mekanis dan organisasi sitoskeleton berkontribusi pada stabilitas dan arah aliran auksin. Analisis komparatif literatur menunjukkan bahwa protein PAT dan PIN beroperasi melalui mekanisme yang saling terkait untuk mengontrol arah distribusi auksin, yang pada akhirnya membentuk susunan spasial dan keteraturan pola primordium daun. Secara keseluruhan, tinjauan ini menekankan kompleksitas dan integrasi sinyal hormonal, genetik, dan mekanis dalam mengontrol filotaksis pada tumbuhan.

Kata kunci: Arabidopsis; Auksin; Filotaksis; PIN; Polaritas.

1. LATAR BELAKANG

Tumbuhan memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi dalam menghadapi perubahan lingkungan. Kemampuan adaptasi pada tumbuhan meliputi kemampuan membentuk organ baru seperti akar lateral, daun dan bunga untuk dapat bertahan dalam kondisi tertentu. Pola arah pertumbuhan ini dipengaruhi oleh jumlah auksin pada tumbuhan khususnya pada ujung primordial. Arabidopsis merupakan tumbuhan model yang banyak diteliti, baik dalam penelitian pada tingkat genom, organel, sel, jaringan, proteom subseluler, serta proses perkembangan dan respons tanaman terhadap stres biotik dan abiotik menggunakan berbagai

metode kuantitatif (Wienkoop *et al.* 2010). Penelitian menggunakan *Arabidopsis* sebagai tanaman model juga dilakukan untuk mengamati arah pertumbuhan tanaman. Menurut Wienkoop *et al.* (2010) pada *Arabidopsis thaliana* protein pengangkut auksin mampu mengatur filotaksis, hal ini menyebabkan penumpukan auksin hanya terjadi pada jarak minimal tertentu dari primordia yang sudah terbentuk, sehingga menentukan posisi primordia baru.

Menurut Benková *et al.*, (2003) pola primordium daun pada *Arabidopsis Thaliana* menunjukkan bahwa jumlah auksin berbasis protein *pin formed* (PIN) mampu mempengaruhi pembentukan organ tumbuhan tanpa memandang bentuk atau asal perkembangannya. Jumlah auksin dan pertumbuhan memiliki korelasi, hal ini dikarenakan PIN1 yang merupakan tranporter auksin mempengaruhi arah susunan mikrotubulus pada sel (Heisler *et al.*, 2010). Berdasarkan hasil penelitian Yadav *et al.* (2023) pola meristem dan primordium bunga juga dipengaruhi oleh biosintesis auksin, pada *Arabidopsis* tanpa adanya biosintesis dan transport auksin pertumbuhan meristem pucuk akan terganggu. *Polar auxin transport* (PAT) mengatur arah pertumbuhan daun dan pola tulang daun dengan membentuk titik konvergensi auksin, hal ini memicu pembentukan daun dan tulang daun utama (Wenzel *et al.* 2024).

Berbagai penelitian telah menjelaskan peran auksin dalam pembentukan primordium daun pada *Arabidopsis thaliana*, namun hasil dari penelitian tersebut perlu dihubungkan antar satu sama lain untuk mengkaji peran auksin dalam proses primordial daun. Selain itu, perbedaan metode dan indikator yang digunakan antar penelitian membuat hasil-hasil tersebut sulit dibandingkan langsung. Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian artikel yang menggabungkan, mengelompokkan, dan menganalisis kembali temuan-temuan tersebut agar diperoleh pemahaman yang lebih terpadu tentang bagaimana arah distribusi auksin dapat mempengaruhi pola primordium daun. Tujuan kajian artikel ini untuk menganalisis dan mengintegrasikan hasil penelitian terkait arah distribusi auksin dalam mengatur pola primordium daun pada *Arabidopsis*.

2. KAJIAN TEORITIS

Perkembangan tumbuhan terjadi pada bagian meristem apikal yang berfungsi sebagai tempat penyimpanan sel punca pada tumbuhan (Raven *et al.*, 2013). Susunan teratur daun pada batang ini disebut filotaksis (Hopkins & Hüner, 2009; Salisbury & Ross, 1992). Auksin (IAA) adalah hormon pertumbuhan yang mengatur perkembangan seluler (Taiz *et al.*, 2015). Tidak seperti hormon pada umumnya, sinyal auksin sangat bergantung pada transpor auksin polar/*Polar Auxin Transport* (PAT) yakni aliran auksin yang terarah dan aktif dari satu sel ke sel lainnya (Buchanan *et al.*, 2015). PAT ini diatur oleh protein efluks yang disebut *Pin-Formed*

(PIN). Polaritas protein PIN pada membran sel merupakan faktor penentu arah distribusi auksin yang berperan dalam proses morfogenesis tumbuhan (Taiz *et al.*, 2015; Buchanan *et al.*, 2015).

3. METODE KAJIAN

Metode kajian literature yang digunakan adalah mengkaji dari berbagai literatur melalui kajian sistematik menggunakan *Mendeley Reference Manager*. Literatur yang dijadikan rujukan berasal dari jurnal penelitian nasional maupun internasional, disertasi dan laporan tugas akhir berhubungan dengan topik yang akan dikaji yaitu arah distribusi auksin dalam mengatur pola primordium daun pada Arabidopsis.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Auksin merupakan hormon tumbuhan yang berperan penting dalam fase awal organogenesis pada tumbuhan khususnya dibagian pucuk dengan menjaga keseimbangan antara sel punca di pusat meristem pucuk *Shoot Apical Meristem* (SAM). Pola ini terutama diatur oleh *Polar Auxin Transport* (PAT) atau yang disebut juga transpor auksin yang terarah, dimana mekanisme ini dikendalikan oleh protein *Pin-Formed* (PIN) yang merupakan protein pengangkut auksin efluks Benková *et al.* (2003) menunjukkan bahwa gradien auksin yang dihasilkan oleh kerja protein PIN merupakan mekanisme umum dan cukup untuk memicu inisiasi organ. Pada Arabidopsis auksin berperan sebagai morfogen yang menggunakan PAT untuk membentuk pola secara mandiri (Adamowski & Friml 2015). Menurut Wenzel *et al.* (2024) ketika kerja PAT terhambat, maka pola pembuluh berubah pada filotaksis. Hal ini menjelaskan bahwa arah aliran auksin merupakan faktor yang dapat menentukan arah pertumbuhan tumbuhan. Arah aliran auksin ditentukan oleh arah orientasi protein PIN pada permukaan sel (*polaritas subseluler*).

Kareem *et al.* (2025) menemukan bahwa jalur genetik TMO5 (gen yang diaktifkan oleh auksin) mengatur konvergensi polaritas PIN1 menuju arah pembentukan organ. Hasil penelitian ini sejalan dengan Hajný *et al.* (2022) dan Mazur *et al.* (2020) bahwa akumulasi auksin yang tepat tergantung pada arah transport auksin. Menurut (Adamowski & Friml 2015) peranan arah transport auksin dalam menentukan arah pertumbuhan harus diintegrasikan dengan mekanisme biosintesis auksin. Yadav *et al.* (2023) menyatakan bahwa auksin diproduksi secara lokal di SAM dan ikut mendorong pembentukan pola dan diferensiasi.

Arah transpor auksin juga dipengaruhi oleh struktur mekanik sel. Heisler *et al.* (2010) menemukan bahwa orientasi PIN1 berkaitan erat dengan orientasi mikrotubulus kortikal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan mekanik dan perubahan bentuk sel, yang berkaitan

dengan dinding sel, dapat mengatur arah PIN begitu pula sebaliknya. Han *et al.* (2021) menambahkan bahwa auksin dapat memicu fosforilasi protein Myosin yang merupakan protein motor sel, yang berperan dalam memengaruhi pergerakan dan posisi PIN. Mekanisme arah pertumbuhan secara genetik memberikan kontribusi dalam mengatur arah pertumbuhan, namun pola tersebut kemudian disempurnakan oleh mekanisme fisik sel seperti orientasi mikrotubulus. Mekanisme tersebut menjelaskan bahwa filotaksis merupakan hasil interaksi antara regulasi gen dan mekanika sel.

Pembentukan primordium tidak hanya ditentukan oleh arah pertumbuhan, tetapi juga waktu yang tepat. Caumon & Vernoux (2023) menjelaskan pentingnya dimensi waktu ini. Tameshige *et al.* (2025) menunjukkan bahwa interval waktu pembentukan daun dikendalikan oleh mekanisme kerja antara auksin dan sinyal peptida EPFL2 yang merupakan peptida pengatur arah pertumbuhan. Peran auksin tidak hanya sebagai pengatur pertumbuhan pada Arabidopsis, tetapi sebagai morfogen (penentu pola) yang membentuk struktur tanaman. Hal ini dikarenakan distribusi auksin dikontrol oleh PAT. Pola polaritas PIN menentukan arah pembentukan primordium daun baru. Ketika arah transpor auksin terganggu, maka pola filotaksis dapat berubah (Wenzel *et al.* 2024). Peran utama auksin pada Arabidopsis adalah menentukan pola pembentukan organ, bukan sekadar mendorong pertumbuhan sel.

5. KESIMPULAN

Tinjauan literatur ini menjelaskan bahwa pola filotaksis pada Arabidopsis ditentukan oleh interaksi antara *Polar Auxin Transport* (PAT), biosintesis auksin, dan mekanika sel, interaksi tersebut berperan sebagai pola pembentuk arah pertumbuhan, bukan hanya pengatur pertumbuhan. Polaritas protein PIN menentukan lokasi primordium, sementara sinyal peptida seperti EPFL2 mengatur waktu pembentukan organ, menghasilkan pola yang stabil melalui kombinasi kontrol spasial dan temporal. Meskipun mekanisme dasarnya sudah dibahas secara sistematis, namun perlu dilakukan kajian literatur lebih lanjut terkait peran kontribusi PAT, biosintesis lokal, hubungan antara sinyal auksin dan respons mekanik sel.

DAFTAR REFERENSI

- Adamowski, M., & Friml, J. (2015). PIN-dependent auxin transport: Action, regulation and evolution. *The Plant Cell*, 27(1), 20–32. <https://doi.org/10.1105/tpc.114.134874>
- Benková, E., Michniewicz, M., Sauer, M., Teichmann, T., Seifertová, D., Jürgens, G., & Friml, J. (2003). Local, efflux-dependent auxin gradients as a common module for plant organ formation. *Cell*, 115(5), 591–602. [https://doi.org/10.1016/S0092-8674\(03\)00924-3](https://doi.org/10.1016/S0092-8674(03)00924-3)

- Bouchez, D., Uyttewaal, M., & Pastuglia, M. (2024). Spatiotemporal regulation of plant cell division. *Plant Biology*, 79, 102530. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2024.102530>
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2015). *Biochemistry and molecular biology of plants* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Caumon, H., & Vernoux, T. (2023). A matter of time: Auxin signaling dynamics and the regulation of auxin responses during plant development. *Journal of Experimental Botany*, 74(14), 3887–3902. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad132>
- Debitama, A. M. N. H., Mawarni, I. A., & Hasanah, U. (2022). Pengaruh hormon auksin sebagai zat pengatur tumbuh pada beberapa jenis tumbuhan Monocotyledoneae dan Dicotyledoneae. *Biodidaktika*, 17(1). <https://doi.org/10.30870/biodidaktika.v17i1.16111>
- Gomes, G. L. B., & Scortecci, K. C. (2021). Auxin and its role in plant development: Structure, signalling, regulation and response mechanisms. *Plant Biology*, 23(6). <https://doi.org/10.1111/plb.13303>
- Hajný, J., Tan, S., & Friml, J. (2022). Auxin canalization: From speculative models toward molecular players. *Current Opinion in Plant Biology*, 65, 102174. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2022.102174>
- Han, H., Verstraeten, I., Roosjen, M., Mazur, E., Rýdza, N., Hajný, J., Ötvös, K., Weijers, D., & Friml, J. (2021). Rapid auxin-mediated phosphorylation of myosin regulates trafficking and polarity in *Arabidopsis*. *bioRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2021.04.13.439603>
- Heisler, M. G., Hamant, O., Krupinski, P., Uyttewaal, M., Ohno, C., Jönsson, H., Traas, J., & Meyerowitz, E. M. (2010). Alignment between PIN1 polarity and microtubule orientation in the shoot apical meristem reveals a tight coupling between morphogenesis and auxin transport. *PLoS Biology*, 8(10), e1000516. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000516>
- Hopkins, W. G., & Hüner, N. P. A. (2009). *Introduction to plant physiology* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Kareem, A., Ohno, C., & Heisler, M. G. (2025). TMO5 regulates PIN1 polarity convergence and organogenesis downstream of Monopteros in the *Arabidopsis* shoot. *Development*, 205255. <https://doi.org/10.1242/dev.205255>
- Kumar, V., Yadav, S., Heymans, A., & Robert, S. (2025). “Shape of cell”: An auxin and cell wall duet. *Physiologia Plantarum*, 177, e70294. <https://doi.org/10.1111/ppl.70294>
- Ma, J., Wang, Y., Chen, S., & Xu, T. (2025). The central role of auxin in orchestrating apical stem cells in plants. *Plant, Cell & Environment*, 48(7), 5053–5072. <https://doi.org/10.1111/pce.15464>
- Mazur, E., Kulik, I., Hajný, J., & Friml, J. (2020). Auxin canalization and vascular tissue formation by TIR1/AFB-mediated auxin signaling in *Arabidopsis*. *New Phytologist*, 226, 1375–1383. <https://doi.org/10.1111/nph.16446>
- Mishra, B. S., Sharma, M., & Laxmi, A. (2021). Role of sugar and auxin crosstalk in plant growth and development. *Physiologia Plantarum*, 174(1). <https://doi.org/10.1111/ppl.13546>
- Omelyanchuk, N. A., Kovrizhnykh, V. V., Oshchepkova, E. A., Pasternak, T., Palme, K., & Mironova, V. V. (2016). A detailed expression map of the PIN1 auxin transporter in

- Arabidopsis thaliana* root. *BMC Plant Biology*, 16, 5. <https://doi.org/10.1186/s12870-015-0685-0>
- Prigge, M. J., Platre, M., Kadakia, N., Zhang, Y., Greenham, K., Szutu, W., Pandey, B. K., Bhosale, R. A., Bennett, M. J., & Busch, W. (2020). Genetic analysis of the *Arabidopsis* TIR1/AFB auxin receptors reveals both overlapping and specialized functions. *eLife*, 9, e54740. <https://doi.org/10.7554/eLife.54740>
- Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2013). *Biology of plants* (8th ed.). W. H. Freeman.
- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1992). *Plant physiology* (4th ed.). Wadsworth Publishing.
- Sari, R. P., Melsandi, M., Fransiska, N., & Fauzi, A. (2018). Hormon auksin dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan cabai rawit (*Capsicum frutescens*) dan cabai keriting (*Capsicum annuum*). In *Prosiding Seminar Nasional IV* (pp. 155–162). Universitas Muhammadiyah Malang.
- Shi, B., & Vernoux, T. (2022). Hormonal control of cell identity and growth in the shoot apical meristem. *Current Opinion in Plant Biology*, 65, 102111. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102111>
- Su, N., Zhu, A., Tao, X., Ding, Z. J., Chang, S., Ye, F., ... Guo, J. (2022). Structures and mechanisms of the *Arabidopsis* auxin transporter PIN3. *Nature*, 610(7930), E2. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05142-w>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Tameshige, T., Tsuchida, T., Matsushita, Y., Doll, Y., Maruyama, K., Agui, T., ... Ikeuchi, M. (2025). Mutual inhibition between EPFL2 and auxin extends the intervals of periodic leaf morphogenesis. *Nature Communications*, 16, 9753. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-65792-y>
- Wenzel, C. L., Holloway, D. M., & Mattsson, J. (2024). The effects of auxin transport inhibition on the formation of various leaf and vein patterns. *Plants*, 13(18), 2566. <https://doi.org/10.3390/plants13182566>
- Wienkoop, S., Baginsky, S., & Weckwerth, W. (2010). *Arabidopsis thaliana* as a model organism for plant proteome research. *Journal of Proteomics*, 73(11), 2239–2248. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2010.07.012>
- Yadav, S., Kumar, H., Mahajan, M., Sahu, S. K., Singh, S. K., & Yadav, R. K. (2023). Local auxin biosynthesis promotes shoot patterning and stem cell differentiation in *Arabidopsis* shoot apex. *Development*, 150(23), 202014. <https://doi.org/10.1242/dev.202014>