

**TRANSPORT MORFOGEN MELALUI PLASMODESMATA DAN PERANNYA  
DALAM PEMBENTUKAN POLA PADA *ARABIDOPSIS THALIANA*:  
SUATU KAJIAN PUSTAKA**

Liya Tri Wahyuni<sup>1</sup>, Wan Syafi'i<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Magister Pendidikan Biologi, Pascasarjana, Universitas Riau

<sup>1</sup> [liya.tri1653@grad.unri.ac.id](mailto:liya.tri1653@grad.unri.ac.id)

**ABSTRACT**

*Morphogens are signaling molecules that provide positional information to determine cell fate and tissue patterning in plants, and in Arabidopsis thaliana, the distribution of these molecules is tightly regulated to ensure developmental stability. This study aims to review the mechanisms of morphogen transport through plasmodesmata and their role in patterning within Arabidopsis thaliana using a literature review method that synthesizes recent findings on symplastic transport, callose regulation, and tissue-specific signaling. Findings indicate that morphogen distribution, including auxin, brassinosteroids, and regulatory proteins like WUSCHEL, occurs through parallel pathways involving both active transport and passive diffusion via plasmodesmata, which is dynamically controlled by callose deposition and degradation at the plasmodesmal neck acting as a biological valve. Furthermore, tissue-specific regulators such as PDLP6 facilitate precise flux control within the vasculature, leading to the conclusion that plasmodesmata-mediated transport is essential for creating accurate concentration gradients to provide positional information, ensuring robust development and enabling morphological diversity through the modulation of symplastic connectivity.*

*Keywords: Arabidopsis thaliana, Callose, Morphogen, Patterning, Plasmodesmata.*

**ABSTRAK**

Morfogen merupakan molekul sinyal yang memberikan informasi posisi untuk menentukan nasib sel dan pembentukan pola jaringan pada tumbuhan, di mana pada *Arabidopsis thaliana*, distribusi molekul-molekul ini diatur secara ketat untuk menjamin stabilitas perkembangan. Studi ini bertujuan untuk meninjau mekanisme transportasi morfogen melalui plasmodesmata dan perannya dalam pembentukan pola pada *Arabidopsis thaliana* dengan menggunakan metode tinjauan pustaka yang menyintesis temuan terbaru mengenai transpor simplastik, regulasi kalosa, dan pensinyalan spesifik jaringan. Temuan menunjukkan bahwa distribusi morfogen, termasuk auksin, brassinosteroid, serta protein pengatur seperti WUSCHEL, berlangsung melalui jalur paralel yang melibatkan transpor aktif dan difusi pasif melalui plasmodesmata yang dikontrol secara dinamis oleh penumpukan dan degradasi kalosa pada leher saluran sebagai katup biologis. Selain itu, regulator spesifik jaringan seperti PDLP6 memfasilitasi kontrol fluks yang presisi di dalam jaringan vaskular, sehingga dapat disimpulkan bahwa transportasi yang dimediasi oleh plasmodesmata sangat penting untuk menciptakan gradien konsentrasi yang akurat dalam memberikan informasi posisi guna menjamin stabilitas perkembangan dan memungkinkan diversitas morfologi melalui modulasi konektivitas simplastik.

Kata kunci: *Arabidopsis thaliana*, Kalosa, Morfogen, Pembentukan Pola, Plasmodesmata.

## **A. Pendahuluan**

Tubuh tumbuhan berbiji ditandai dengan adanya spesialisasi struktur dan fungsi yang dinyatakan dalam diferensiasi tubuh bagian luar menjadi organ-organ dan bagian dalam menjadi sel-sel, jaringan, dan sistem jaringan. Tubuh tumbuhan terdiri atas unit morfologi yang dikenal dengan bagian akar, batang, dan daun. Menurut Tusscher, (2025) perkembangan tumbuhan merupakan proses kompleks yaitu interaksi antara ekspresi gen, komunikasi antar sel, dan dinamika pertumbuhan dan pembelahan sel yang berlangsung secara terkoordinasi dalam ruang dan waktu. Proses tersebut memungkinkan terbentuknya pola jaringan yang terorganisir melalui integrasi berbagai sinyal molekuler. Menurut Kulak *et al.*, (2023) dalam pembentukan pola jaringan, terjadi spesialisasi seluler yang tinggi dan heterogenitas sel, di mana sel-sel mengalami urutan kejadian yang tidak dapat diubah (*irreversible*) untuk mencapai kematangan fungsionalnya

Salah satu aspek penting dalam perkembangan tumbuhan adalah komunikasi antar sel yang berfungsi dalam mengoordinasikan aktivitas seluler. Pada tumbuhan,

komunikasi ini tidak hanya terjadi melalui jalur ekstraseluler, tetapi juga melalui koneksi langsung antar sel melalui plasmodesmata. Menurut Tee & Faulkner, (2024) plasmodesmata merupakan saluran yang dilapisi membran plasma yang menghubungkan sel tumbuhan dengan sel tetangganya yang berfungsi sebagai jalur simpas untuk perpindahan molekul antar sel, jaringan, dan organ. Struktur tersebut mampu mendistribusikan sinyal perkembangan.

Selain mekanisme komunikasi antar sel, pembentukan pola tumbuhan juga dipengaruhi oleh keberadaan morfogen, yaitu molekul sinyal yang membentuk gradien konsentrasi dalam jaringan. Menurut Marconi & Wabnik, (2021) morfogenesis tanaman merupakan proses memperoleh bentuk organ yang dimulai dari sekelompok sel yang belum terdiferensiasi melalui interaksi kompleks antara instruksi genetik, kekuatan mekanik, dan sinyal biokimia. Lebih lanjut dijelaskan bahwa, morfogen seperti hormon auksin, mampu memberikan informasi posisi kepada sel melalui gradien konsentrasi untuk menentukan arah pertumbuhan dan diferensiasi

jaringan. Mekanisme ini sangat penting karena koordinasi antara sinyal kimia morfogen dan tekanan fisik dinding sel yang akhirnya membentuk arsitektur tanaman yang presisi dan adaptif di alam. Menariknya, penyebaran morfogen ini tidak hanya bergantung pada transpor polar aktif, tetapi juga memanfaatkan jalur plasmodesmata secara non-redundan. Jalur simplas ini terbukti penting bagi transportasi hormon antarsel, di mana distribusinya diregulasi secara ketat oleh tanaman melalui metabolisme callose untuk menjaga presisi gradien sinyal dan arsitektur tanaman yang adaptif (Zanini & Burch-smith, 2024). Dengan demikian, interaksi antara plasmodesmata dan morfogen menjadi faktor penting dalam proses pembentukan pola pada tumbuhan.

Pada tanaman model seperti *Arabidopsis thaliana*, mekanisme transport morfogen melalui plasmodesmata telah banyak dipelajari dan menunjukkan peran signifikan dalam pengaturan diferensiasi sel serta pembentukan pola jaringan. Namun, pemahaman mengenai integrasi antara transport simplastik dan mekanisme transport aktif dalam membentuk gradien

morfogen masih terus berkembang. Oleh karena itu, artikel ini bertujuan untuk mengkaji mekanisme transport morfogen melalui plasmodesmata serta perannya dalam pembentukan pola pada *Arabidopsis thaliana*.

## **B. Metode Penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur (literature review) dengan pendekatan kualitatif deskriptif yang fokus pada penelusuran, analisis, dan sintesis berbagai hasil penelitian terkait komunikasi antar sel, distribusi morfogen, serta perkembangan jaringan tumbuhan pada *Arabidopsis thaliana*. Kajian difokuskan pada penelitian yang dipublikasikan dalam kurun waktu 2015–2026 dan buku relevan. Prioritas sumber primer yang berasal dari jurnal ilmiah bereputasi. Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan data literatur menggunakan basis data ilmiah seperti Google Scholar, PubMed, dan ScienceDirect dengan kata kunci morphogen transport, plasmodesmata, auxin transport, cell-to-cell communication, dan *Arabidopsis thaliana*. Kriteria pemilihan literatur meliputi kesesuaian dengan topik penelitian, kebaruan

publikasi, serta relevansi terhadap mekanisme transport morfogen dan pembentukan pola pada tumbuhan. Data yang diperoleh kemudian dianalisis secara deskriptif dengan mengidentifikasi konsep utama, mekanisme biologis, serta hubungan antar variabel yang dibahas dalam masing-masing artikel.

### **C. Hasil Penelitian dan Pembahasan**

#### **1. Dinamika Struktural dan Kontrol Biofisika Plasmodesmata**

Hasil kajian menunjukkan bahwa sel tumbuhan saling berhubungan melalui plasmodesmata (PD), yakni saluran berlapis membran pada dinding sel yang memungkinkan aliran molekul antarsel. Secara struktural, PD bukan sekadar pori statis, melainkan komponen integratif yang menyatu dengan lingkungan sekitarnya, meliputi desmotubule (retikulum endoplasma), membran luar (membran plasma), lengan sitosol, dan dinding sel yang termodifikasi (Brunkard & Burch-Smith, 2026). Kompleksitas ini menandakan adanya kontrol biomekanis yang presisi, di mana tumbuhan memiliki kompartemen khusus untuk mengatur fluks molekul secara selektif.

Mekanisme regulasi PD bertindak sebagai "katup biologis" yang diatur oleh penumpukan dan degradasi kalosa di area leher saluran (Simonaviciene *et al.*, 2026). Aktivitas enzim Callose Synthase (CALS) memicu penyempitan saluran melalui akumulasi kalosa, sedangkan enzim Beta-1,3-Glucanase (BG) mendegradasi kalosa untuk meningkatkan permeabilitas (Z. Li *et al.*, 2024). Pendekatan pencitraan resolusi tinggi mengonfirmasi bahwa perubahan konduktivitas ini berkorelasi langsung dengan dinamika kalosa (Zhang *et al.*, 2022). Fleksibilitas ini memungkinkan PD berfungsi sebagai pusat integrasi sinyal yang sangat dinamis, di mana permeabilitasnya dapat berubah dalam hitungan menit sebagai respons terhadap stres atau sinyal hormonal (Paterlini, 2023).

#### **2. Sinergi Jalur Transpor dan Stabilitas Gradien Morfogen**

Sebagai molekul sinyal, morfogen membentuk gradien konsentrasi yang memberikan informasi posisi (positional information) untuk menentukan nasib sel dan pembentukan pola jaringan (Simsek & Özbudak, 2026). Temuan signifikan dalam studi ini adalah

adanya jalur transportasi paralel pada distribusi auksin, yakni transpor aktif melalui protein PIN dan difusi pasif melalui plasmodesmata (J. Li *et al.*, 2024). Sinergi ini memberikan mekanisme robustness (ketahanan); jika satu jalur terganggu, jalur lainnya dapat mengompensasi untuk memastikan informasi posisi tetap akurat (Anfang & Shani, 2023).

Integrasi jalur simplastik juga terlihat pada distribusi brassinosteroid (BR) yang memerlukan PD untuk transpor intermedial (Wang *et al.*, 2024). Adanya mekanisme umpan balik, di mana akumulasi hormon merangsang deposisi kalosa, menunjukkan sistem kontrol mandiri (self-regulating) yang mencegah kejenuhan sinyal. Hal ini krusial untuk menjaga kemiringan gradien konsentrasi yang presisi bagi penentuan nasib sel.

### **3. Spesifisitas Jaringan dan Pembentukan Pola pada *Arabidopsis thaliana***

Pada meristem (Shoot Apical Meristem/SAM dan Root Apical Meristem/RAM) serta epidermis akar *Arabidopsis*, akurasi pola sangat bergantung pada distribusi morfogen. Pola ekspresi gen WUSCHEL (WUS) pada SAM terjaga melalui distribusi

spasial yang ketat (Adibi *et al.*, 2016). Pergerakan protein pengatur ini tidak hanya bergantung pada ukuran saluran, tetapi juga melibatkan mekanisme selektif melalui interaksi dengan protein chaperon atau modifikasi pasca-translasi (Schreiber *et al.*, 2024). Hal ini menjelaskan mengapa molekul besar seperti WUS atau SHORTROOT dapat berpindah secara teratur untuk menjaga populasi sel punca, sementara molekul lain tetap terisolasi.

Lebih lanjut, pembentukan pola epidermis akar melibatkan mekanisme inhibisi lateral yang dimediasi oleh pergerakan protein antarsel untuk memastikan distribusi sel rambut (hair cells) yang teratur (Castillo-jiménez *et al.*, 2025). Mengingat akar *Arabidopsis* memiliki tipe sel yang terpetakan jelas, modulasi hormon yang mengintegrasikan sinyal internal dan eksternal menjadi kunci perkembangan epidermis dan RAM (Lv *et al.*, 2026).

### **4. Spesialisasi Vaskular dan Implikasi Evolusioner**

Pada jaringan vaskular, regulasi transpor simplastik dikontrol secara spesifik oleh kompleks protein PDLP6, SUS6 (Sucrose Synthase 6), dan

CALS7 (Z. Li *et al.*, 2024). Keterlibatan SUS6 mengindikasikan integrasi antara status energi (metabolisme sukrosa) dengan kontrol struktural transportasi. Hal ini menunjukkan strategi efisiensi di mana floem harus menjaga integritas transportasi jarak jauh melalui aktivitas spesifik gen CalS7 dalam mengontrol fluks molekul (N. Li *et al.*, 2023).

Secara evolusioner, diversifikasi bentuk organ tumbuhan tampaknya lebih banyak didorong oleh adaptasi pada mekanisme transportasi yang sudah ada daripada kemunculan morfogen baru (Mosby *et al.*, 2024). Dengan memodifikasi konduktivitas simplastik melalui "penyetelan" plasmodesmata, tumbuhan dapat mengubah skala dan spasi pola jaringan. Strategi ini memberikan fleksibilitas bagi tanaman untuk mencapai efisiensi transportasi nutrisi dan ketahanan lingkungan tanpa harus merombak perangkat genetik dasarnya.

#### **D. Kesimpulan**

Mekanisme pembentukan pola pada *Arabidopsis thaliana* sangat bergantung pada kontrol dinamis plasmodesmata yang berfungsi sebagai katup biologis melalui

regulasi kalosa. Jalur transportasi simplastik ini bekerja secara paralel dengan transpor aktif untuk mendistribusikan morfogen, baik berupa hormon (auksin, brassinosteroid) maupun protein pengatur (WUSCHEL), guna menciptakan gradien konsentrasi yang akurat. Keberadaan protein spesifik seperti PDL6 memastikan informasi posisi tersampaikan tepat pada jaringan tertentu, menjamin stabilitas perkembangan dan mendorong diversitas morfologi tanaman.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Adibi, M., Yoshida, S., Weijers, D., & Fleck, C. (2016). Centering the Organizing Center in the *Arabidopsis thaliana* Shoot Apical Meristem by a Combination of Cytokinin Signaling and. *PLoS One*, *11*(2), 1–28.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147830>
- Anfang, M., & Shani, E. (2023). Transport mechanisms of plant hormones. *Curr Opin Plant Biology*, *1*(63), 1–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102055>.Transport
- Brunkard, J. O., & Burch-Smith, T. M. (2026). Plasmodesmata Plant. *Journal of Experimental Botany*, *77*(3), 689–691.

- <https://doi.org/10.1093/jxb/eraf518>
- Castillo-jiménez, A., Garay-arroyo, A., La, M. De, & Sánchez, P. (2025). Cellular patterns in Arabidopsis root epidermis emerge from gene regulatory network and diffusion dynamical feedback. *Npj Systems Biology and Applications*, 11(107), 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41540-025-00551-9>
- Kuřak, K., Wojciechowska, N., Czajka, A. S., Jackowiak, P., & Zadworna, A. B. (2023). How to explore what is hidden? A review of techniques for vascular tissue expression profile analysis. *Plant Methods*, 19(129), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13007-023-01109-8>
- Li, J., Yang, J., Gao, Y., Zhang, Z., Gao, C., Chen, S., & Liesche, J. (2024). Parallel auxin transport via PINs and plasmodesmata during the Arabidopsis leaf hyponasty response. *Plant Cell Reports*, 43(4), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00299-023-03119-1>
- Li, N., Lin, Z., Yu, P., Zeng, Y., & Du, S. (2023). The multifarious role of callose and callose synthase in plant development and environment interactions. *Frontiers in Plant Science*, 14(1183402), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1183402>
- Li, Z., Liu, S., Montes-serey, C., & Walley, J. W. (2024). Plasmodesmata Located Protein 6 regulates plasmodesmal function in Arabidopsis vasculature. *The Plant Cell*, 36(9), 3543–3561. <https://doi.org/10.1093/plcell/koae166>
- Lv, B., Liu, J., Tian, H., Li, M., Wu, S., Xuan, W., Chuanyou, & Ding, Z. (2026). Arabidopsis Root Development. In *Regulation of Plant Development* (pp. 1–44). Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-95-7033-1>
- Marconi, M., & Wabnik, K. (2021). Shaping the Organ : A Biologist Guide to Quantitative Models of Plant Morphogenesis. *Frontiers in Plant Science*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.746183>
- Mosby, L. S., Bowen, A. E., & Hadjivasiliou, Z. (2024). Morphogens in the evolution of size , shape and patterning. *The Company of Biologists*, 151(2), 1–14. <https://doi.org/10.1242/dev.202412>
- Paterlini, A. (2023). A year at the forefront of plasmodesmal biology. *The Company of Biologists*, 12(123), 10–13. <https://doi.org/10.1242/bio.060123>
- Schreiber, J. M., Limpens, E., & Keijzer, J. de. (2024). Distributing Plant Developmental Regulatory Proteins via Plasmodesmata. *Plants*, 13(684), 1–22.
- Simonaviciene, B., Newcombe, E.,

- Gresty, A., & Benitez-alfonso, Y. (2026). Plasmodesmata wall biomechanics: challenges and opportunities. *Journal of Experimental Botany*, 77(3), 853–864.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/eraf392>
- Simsek, M. F., & Özbudak, E. M. (2026). Patterning principles of morphogen gradients. *Open Biology*, 12(1), 1–19.  
<https://doi.org/10.1098/rsob.220224/935198/rsob.220224.pdf>
- Tee, E. E., & Faulkner, C. (2024). Tansley review Plasmodesmata and intercellular molecular traffic control. *New Phytologist*, 243(5), 32–47.  
<https://doi.org/10.1111/nph.19666>
- Tusscher, K. H. ten. (2025). Tansley review Computational modeling of plant root development: the art and the science. *New Phytologist*, 246(2), 2446–2461.  
<https://doi.org/10.1111/nph.70164>
- Wang, Y., Perez-sancho, J., Platre, M. P., Callebaut, B., Ferrer, K., Luo, Y., Nolan, T. M., Sato, T., Benfey, P. N., Kvasnica, M., Winne, J. M., Bayer, E. M., Vukašinović, N., & Russinova, E. (2024). *Plasmodesmata mediate cell-to-cell transport of brassinosteroid hormones* (Vol. 19, Issue 11).  
<https://doi.org/10.1038/s41589-023-01346-x>. Plasmodesmata
- Zanini, A. A., & Burch-smith, T. M. (2024). New insights into plasmodesmata: complex protoplasmic connecting threads.' *Journal of Experimental Botany*, 75(18), 5557–5567.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jxb/erae307>
- Zhang, Q., Gong, M., Xu, X., Li, H., & Deng, W. (2022). Roles of Auxin in the Growth, Development, and Stress Tolerance of Horticultural Plants. *Cells*, 11(2761), 1–15.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/cells11172761>