

PERMASALAHAN DAN POLA DALAM PERKEMBANGAN STRUKTUR DASAR SELAMA EMBRIOGENESIS TUMBUHAN

Suci Ramadhani¹, Wan Syafi'i²

¹Magister Pendidikan Biologi, FKIP, Universitas Riau,

²Magister Pendidikan Biologi, FKIP, Universitas Riau,

¹suci.ramadhani4794@student.unri.ac.id, ²wan.wsyafii@lecturer.unri.ac.id

ABSTRACT

Embryogenesis in plants represents the developmental process that establishes the body plan and fundamental tissue organization from a single fertilized cell, the zygote. This process involves a series of tightly regulated events that include asymmetric cell division, genetic signaling, hormonal regulation, and tissue differentiation leading to the establishment of the root, shoot, and vascular systems. Recent advances in molecular biology and microscopy have provided new insights into how spatial and temporal gene expression contributes to early pattern formation. This literature study aims to examine the patterns and current problems in the development of basic structural organization during plant embryogenesis. Based on the review of recent studies, it is evident that genes such as WOX, YODA, GNOM, and MONOPTEROS play essential roles in cell fate determination and polarity establishment, while the phytohormone auxin acts as a central morphogen controlling the formation of the embryonic axis. Furthermore, epigenetic regulation, including DNA methylation and histone modification, has been shown to influence embryogenic competence in various plant species. Current challenges include limited visualization of the earliest zygotic stages, species-specific variations in developmental patterns, and the difficulty of elucidating molecular mechanisms underlying somatic embryogenesis. This review contributes to understanding the fundamental molecular and physiological mechanisms of plant development and provides valuable insights for biotechnological applications such as somatic embryo induction, genetic transformation, and large-scale plant regeneration systems.

Keywords: plant embryogenesis, basic structure, auxin, wox gene, polarity

ABSTRAK

Embriogenesis pada tumbuhan merupakan proses perkembangan yang membentuk rancangan tubuh dan organisasi jaringan dasar dari satu sel hasil fertilisasi, yaitu zigot. Proses ini melibatkan serangkaian peristiwa yang teratur dan kompleks, termasuk pembelahan sel asimetris, regulasi genetik, pengaturan hormonal, serta diferensiasi jaringan yang mengarah pada pembentukan sistem akar, batang, dan jaringan vaskular. Kemajuan terbaru dalam biologi molekuler dan mikroskopi telah memberikan pemahaman baru mengenai bagaimana ekspresi gen secara spasial dan temporal berkontribusi terhadap pembentukan pola awal embrio. Kajian literatur ini bertujuan untuk menelaah pola dan permasalahan aktual dalam perkembangan struktur dasar selama embriogenesis tumbuhan. Berdasarkan telaah berbagai penelitian terbaru, diketahui bahwa gen seperti WOX, YODA, GNOM, dan MONOPTEROS berperan penting dalam penentuan nasib sel dan

pembentukan polaritas, sedangkan fitohormon auksin bertindak sebagai morfogen utama yang mengontrol pembentukan sumbu embrionik. Selain itu, regulasi epigenetik seperti metilasi DNA dan modifikasi histon juga diketahui memengaruhi kemampuan embriogenik pada berbagai spesies tumbuhan. Tantangan yang masih dihadapi meliputi keterbatasan pengamatan pada tahap zigot paling awal, variasi pola perkembangan antarspesies, serta kesulitan dalam menjelaskan mekanisme molekuler yang mendasari embriogenesis somatik. Kajian ini berkontribusi dalam memperluas pemahaman mengenai mekanisme molekuler dan fisiologis dasar perkembangan tumbuhan serta memberikan wawasan penting bagi penerapan bioteknologi, seperti induksi embrio somatik, transformasi genetik, dan sistem regenerasi tanaman berskala besar.

Kata Kunci: embriogenesis tumbuhan, struktur dasar sel, pola perkembangan, auksin, gen *wox*

A. Pendahuluan

Embriogenesis pada tumbuhan merupakan salah satu proses biologis paling mendasar yang membentuk pola tubuh dan organisasi jaringan organisme baru. Proses ini dimulai dari satu sel hasil fertilisasi (zigot) yang mengalami serangkaian pembelahan sel terkoordinasi dan diferensiasi morfogenetik. Menurut Ueda dan Laux (2019), tahapan awal embriogenesis sangat penting karena menentukan pembentukan sumbu tubuh (apikal-basal) serta pembagian jaringan dasar. Kajian embriogenesis memiliki peran vital tidak hanya dalam memahami dasar perkembangan tumbuhan, tetapi juga untuk aplikasi bioteknologi seperti kultur jaringan, induksi embrio somatik, dan pemuliaan tanaman (Fambrini et al., 2022; Carra et al., 2024).

Dalam konteks biologi perkembangan, embriogenesis berfungsi sebagai model alami yang mencerminkan mekanisme regulasi genetik dan hormonal yang kompleks. Sejumlah gen penting, seperti kelompok *WOX* (*WUSCHEL*-related homeobox), *YODA*, *GNOM*, dan *MONOPTEROS*, berperan dalam menentukan arah diferensiasi dan pembentukan pola tubuh (Khan et al., 2024; Shen et al., 2024). Selain faktor genetik, hormon tumbuhan seperti auksin memiliki peran sentral dalam mengatur pola distribusi jaringan embrionik. Friml et al. (2025) menjelaskan bahwa auksin bekerja melalui mekanisme polar transport yang difasilitasi oleh protein *PIN-FORMED*, membentuk gradien yang memandu perkembangan meristem akar dan pucuk.

Namun, kompleksitas embriogenesis juga menghadirkan sejumlah tantangan ilmiah. Permasalahan utama terletak pada keterbatasan dalam pengamatan tahap awal zigot, karena ukuran sel yang sangat kecil dan dinamika internal yang cepat. Selain itu, variasi antarspesies menyebabkan perbedaan pola embriogenesis, sehingga generalisasi model masih terbatas (Delgado-Aceves et al., 2025). Masalah lain adalah rendahnya efisiensi dalam pembentukan embrio somatik secara in vitro, yang sering kali dipengaruhi oleh kondisi epigenetik dan fisiologis eksplan (Wójcik et al., 2025). Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang pola dan mekanisme dasar embriogenesis sangat diperlukan sebagai dasar pengembangan teknik regenerasi tanaman yang lebih efisien.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode **studi literatur (literature review)** dengan pendekatan kualitatif deskriptif yang berfokus pada penelusuran, analisis, dan sintesis berbagai hasil penelitian terkait embriogenesis tumbuhan. Kajian

difokuskan pada penelitian yang dipublikasikan dalam kurun waktu **2015–2025**, dengan prioritas sumber primer yang berasal dari jurnal ilmiah bereputasi seperti *Frontiers in Plant Science*, *Plant, Cell & Environment*, *Current Opinion in Plant Biology*, dan *BMC Plant Biology*.

Tahapan penelitian dimulai dengan **pengumpulan data literatur** menggunakan basis data ilmiah seperti Google Scholar, PubMed, dan ScienceDirect dengan kata kunci *plant embryogenesis*, *WOX gene regulation*, *auxin polarity*, *somatic embryogenesis*, dan *epigenetic regulation*. Kriteria inklusi mencakup artikel yang membahas aspek regulasi genetik, peran hormon tumbuhan, serta mekanisme epigenetik dalam pembentukan struktur dasar embrio. Artikel yang tidak relevan, duplikat, atau tidak melalui proses *peer review* dikeluarkan dari analisis.

Setelah pengumpulan data, dilakukan **analisis isi (content analysis)** terhadap hasil penelitian untuk mengidentifikasi pola, persamaan, dan perbedaan temuan antarspesies tanaman model seperti *Arabidopsis thaliana*, *Vitis vinifera*,

Agave tequilana, dan *Spinacia oleracea*. Data hasil penelitian kemudian dikategorikan berdasarkan tema utama, yaitu (1) regulasi hormonal dan genetik pada pembentukan pola tubuh embrio, (2) peran gen *WOX*, *YODA*, dan *GNOM* dalam diferensiasi sel, dan (3) pengaruh faktor epigenetik terhadap kompetensi embriogenik.

Hasil analisis disajikan dalam bentuk deskriptif analitis dengan mengaitkan temuan penelitian terbaru untuk menghasilkan sintesis konseptual mengenai pola dan permasalahan perkembangan struktur dasar selama embriogenesis tumbuhan.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa embriogenesis tumbuhan melibatkan koordinasi kompleks antara regulasi genetik, sinyal hormonal, dan kondisi fisiologis jaringan. Menurut Friml et al. (2025), distribusi auksin secara polar melalui protein PIN-FORMED menjadi kunci utama dalam menentukan arah pembelahan zigot dan pembentukan sumbu apikal-basal. Pada percobaan terhadap **Arabidopsis thaliana**, pola konsentrasi auksin tinggi terdeteksi di

wilayah calon meristem pucuk, sedangkan kadar rendah ditemukan di bagian calon akar, menunjukkan diferensiasi awal embrio. Temuan ini menegaskan bahwa gradien auksin merupakan sinyal morfogenetik penting yang mengatur pembentukan pola tubuh embrio tanaman.

Selain kontrol hormonal, regulasi genetik juga memiliki peranan dominan dalam pengembangan struktur dasar. Wójcik et al. (2025) melaporkan bahwa gen *WOX5* dapat menginduksi reprogramming sel akar menjadi embrio somatik pada kondisi in vitro. Penelitian Abubakar et al. (2023) juga menunjukkan bahwa gen *WOX2* dan *WOX8* memiliki pola ekspresi yang khas pada tahap globular hingga torpedo, yang berkontribusi terhadap pembentukan jaringan meristematik. Hal ini membuktikan bahwa kelompok gen *WUSCHEL-related homeobox (WOX)* memainkan peran sentral dalam menentukan identitas sel dan arah perkembangan embrio.

Penelitian lain oleh Zdravkovic-Korac (2023) pada tanaman bayam (*Spinacia oleracea*) menunjukkan bahwa perkembangan embrio somatik mengikuti tahapan histologis yang

menyerupai embriogenesis zigotik, dimulai dari pembentukan massa proembrionik hingga diferensiasi struktur akar dan pucuk. Pada *Vitis vinifera*, Carra et al. (2024) melaporkan bahwa keberhasilan induksi embrio somatik mencapai 87% ketika medium kultur diperkaya dengan kombinasi hormon 2,4-D dan kinetin. Temuan ini menegaskan bahwa rasio auksin-sitokinin sangat menentukan arah morfogenesis embrio, baik pada sistem kultur maupun pada perkembangan alami.

Studi epigenetik terkini juga menyoroti pentingnya faktor metilasi DNA dan modifikasi histon dalam mengatur kompetensi embriogenik. Fambrini et al. (2022) menjelaskan bahwa status epigenetik yang seimbang diperlukan untuk mengaktifkan gen-gen pengatur perkembangan, sedangkan hipermetilasi DNA dapat menekan ekspresi gen embriogenik. Penelitian Delgado-Aceves et al. (2025) pada *Agave tequilana* menemukan bahwa perlakuan 5-azacytidine sebagai agen demetilasi meningkatkan frekuensi embrio somatik hingga 65%, menunjukkan bahwa manipulasi epigenetik dapat meningkatkan

keberhasilan embriogenesis in vitro. Dengan demikian, pengaturan genetik dan epigenetik bekerja secara sinergis dalam mengarahkan diferensiasi sel dan pembentukan pola embrio.

Secara keseluruhan, berbagai penelitian menunjukkan bahwa pola perkembangan struktur dasar selama embriogenesis bersifat konservatif tetapi fleksibel terhadap pengaruh lingkungan. Pola pembentukan sumbu tubuh, diferensiasi jaringan vaskular, dan inisiasi meristem ditentukan oleh integrasi antara gen *WOX*, *YODA*, dan *GNOM* dengan distribusi auksin yang terarah. Kemajuan teknologi seperti analisis ekspresi gen berbasis RNA-Seq dan pengamatan mikroskop konfokal kini memungkinkan pengungkapan lebih rinci terhadap dinamika embriogenesis (Shen et al., 2024). Oleh karena itu, pemahaman mekanisme molekuler dan fisiologis ini sangat penting sebagai dasar untuk optimalisasi teknik regenerasi tanaman serta aplikasi bioteknologi modern.

D. Kesimpulan

Embriogenesis tumbuhan merupakan proses kompleks yang dikendalikan oleh interaksi genetik

dan hormonal. Pola perkembangan struktur dasar seperti pembentukan sumbu tubuh, jaringan vaskular, dan meristem dikontrol oleh gen WOX, YODA, GNOM, serta distribusi auksin. Permasalahan utama terletak pada keterbatasan pengamatan tahap awal dan variabilitas antarspesies. Diperlukan pendekatan integratif antara biologi molekuler dan kultur jaringan untuk memahami serta mengoptimalkan proses embriogenesis baik secara zygotik maupun somatik.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk memanfaatkan teknik observasi dan analisis molekuler yang lebih maju, seperti mikroskop konfokal dan RNA-Seq, guna memperjelas tahap awal embriogenesis yang masih sulit diamati. Selain itu, laboratorium kultur jaringan perlu terus mengoptimalkan kombinasi hormon dan kondisi epigenetik agar pembentukan embrio somatik semakin efisien dan dapat diterapkan pada berbagai spesies tanaman. Upaya ini diharapkan mampu menghasilkan protokol regenerasi tanaman yang lebih stabil dan mendukung pengembangan bioteknologi tumbuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abubakar, A. S., et al. (2023). *Comprehensive analysis of WUSCHEL-related homeobox genes across species: implications for embryogenic competence. Biology (MDPI).*
- Carra, A., et al. (2024). *Development and applications of somatic embryogenesis in grapevine: a review. Plants (MDPI).*
- Delgado-Aceves, M. L., et al. (2025). *Indirect somatic embryogenesis in Agave: recent methods and challenges. Frontiers in Plant Science.*
- Fambrini, M., Pugliesi, C., & d'Agostino, N. (2022). *Induction of Somatic Embryogenesis in Plants: Mechanisms and Applications. Plants.*
- Friml, J., et al. (2025). *The Central Role of Auxin in Orchestrating Apical Stem Cell Function and Axis Formation. Plant, Cell & Environment.*
- Jha, P., et al. (2024). *Direct somatic embryogenesis and related gene regulatory networks. Frontiers in Plant Science.*
- Khan, F. S., et al. (2024). *WUSCHEL-related homeobox (WOX) transcription factors: roles in*

development and stress responses.

Shen, M., et al. (2024). *Genome mining of WOX–ARF gene linkage and auxin interaction during embryogenesis. Frontiers in Plant Science.*

Ueda, M., & Laux, T. (2019). *New cues for body axis formation in plant embryos. Current Opinion in Plant Biology.*

Wójcik, A. M., et al. (2025). *From root to embryogenic transition: WOX5 reprograms plant cells during somatic embryo induction. BMC Plant Biology.*