

Integration of Tissue Culture, Somatic Embryogenesis, and Molecular Biotechnology in Oil Palm

Fatimah Ayuza Tantri¹, Siti Fatonah^{1*}, Rismayanti²

¹Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau, Pekanbaru, Riau, Indonesia;

²Pusat Riset Botani Terapan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang Selatan, Banten, Indonesia;

Article History

Received : June 11th, 2026

Revised : August 28th, 2026

Accepted : October 05th, 2026

*Corresponding Author: **Siti Fatonah**, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia;
Email: fath0104@gmail.com

Abstract: Oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) is a leading oil-producing crop, yet productivity improvement remains constrained by a long breeding cycle, genotype-dependent tissue culture response, low regeneration efficiency, and potential genetic or epigenetic variation among clones. This review synthesizes advances in tissue culture, somatic embryogenesis, cryopreservation, biotization, biological control, bioinformatics, transcriptomics, and genetic transformation supporting accelerated oil palm breeding. A systematic narrative approach was applied to 20 international journal articles, followed by deduplication, literature matrix extraction, thematic synthesis, and critical analysis. The synthesis indicates that somatic embryogenesis is the central platform for clonal propagation and transformation, but its success depends strongly on explant position, medium composition, culture system, genotype, and hormonal-epigenetic status. *Temporary immersion*/RITA systems, macronutrient enrichment, auxin-cytokinin combinations, and selection of responsive genotypes improve callus formation, shoot growth, and regeneration. Omics, molecular markers, and DNA methylation analyses provide opportunities to identify biomarkers of highly embryogenic ortets, while cryopreservation supports germplasm conservation.

Keywords: *Elaeis guineensis*; Cryopreservation; Molecular biotechnology; Somatic embryogenesis; Tissue culture.

Pendahuluan

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan tanaman penghasil minyak nabati dengan produktivitas tinggi dan pemanfaatan luas pada berbagai sektor. Peningkatan produktivitas dan keberlanjutan komoditas ini memerlukan bahan tanam unggul dengan karakter agronomis yang stabil. Namun, perbaikan genetik melalui pemuliaan konvensional menghadapi kendala berupa siklus generasi yang panjang, sifat menyerbuk silang, serta kebutuhan evaluasi dalam waktu relatif lama. Oleh karena itu, pendekatan bioteknologi diperlukan untuk mendukung pemuliaan melalui percepatan seleksi dan perbanyakan genotipe

elite dalam pengembangan bahan tanam unggul (Martin et al., 2022).

Kultur jaringan melalui embriogenesis somatik merupakan teknologi penting dalam perbanyakan klonal kelapa sawit karena memungkinkan regenerasi bahan tanaman terpilih dalam jumlah besar (Babu et al., 2025; Balzon et al., 2026). Keberhasilannya dipengaruhi oleh genotipe, sumber eksplan, komposisi media, zat pengatur tumbuh, dan lingkungan kultur. Pengaruh genotipe terhadap induksi kalus, pembentukan embrio somatik, dan regenerasi telah dilaporkan pada berbagai bahan pemuliaan kelapa sawit (Astari et al., 2024). Selain itu, posisi daun dan penggunaan sistem *temporary immersion* memengaruhi proses

embriogenesis dan regenerasi (Gomes et al., 2024), sedangkan infloresens jantan muda dapat digunakan sebagai sumber eksplan dengan respons yang dipengaruhi oleh media dan kombinasi zat pengatur tumbuh (Babu et al., 2025). Suplementasi silikon pada media kultur juga dilaporkan meningkatkan regenerasi embrio somatik (Oliveira et al., 2024).

Perkembangan penelitian embriogenesis somatik kelapa sawit telah bergeser dari optimasi kultur secara empiris menuju pemahaman mekanisme fisiologis dan molekuler. Variasi hormon endogen diketahui berkaitan dengan kemampuan induksi kalus dan embrioid (Karyanti et al., 2024). Pada tingkat molekuler, analisis transkriptomik mengidentifikasi 1.911 *differentially expressed genes* antara ortet dengan tingkat embriogenesis tinggi dan rendah, termasuk gen yang berkaitan dengan ABA, brassinosteroid, dan auksin (Sahara et al., 2023). Analisis proteomik juga mengidentifikasi protein yang diekspresikan secara berbeda selama tahapan embriogenesis somatik dan berpotensi dikembangkan sebagai kandidat biomarker (Khianchaikhan et al., 2023).

Meskipun berbagai kemajuan telah dicapai, keberhasilan embriogenesis somatik masih dipengaruhi oleh variasi respons antar-genotipe dan interaksi kompleks antara kondisi fisiologis eksplan, lingkungan kultur, serta regulasi molekuler. Selain itu, keberhasilan kultur jaringan tidak hanya ditentukan oleh pembentukan embrio dan regenerasi *in vitro*, tetapi juga oleh kualitas dan kestabilan regeneran serta keberhasilan tanaman selama transisi menuju kondisi *ex vitro*. Oleh karena itu, masih diperlukan kerangka yang menghubungkan faktor penentu kompetensi embriogenik dengan kualitas regeneran dan teknologi pendukung untuk menghasilkan bahan tanam yang stabil dan adaptif.

Perkembangan mutakhir menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi regenerasi terus dilakukan melalui inovasi sistem kultur, termasuk sistem kultur dua fase (Meira et al., 2025), sementara pendekatan transkriptomik dan proteomik membuka peluang identifikasi kandidat biomarker kompetensi embriogenik (Sahara et al., 2023; Khianchaikhan et al., 2023).

Kajian terkini juga telah mengintegrasikan aspek transformasi genetik, embriogenesis somatik, transkriptomik, proteomik, epigenetik, dan keterbatasan regenerasi kelapa sawit (Rauf et al., 2025). Di sisi lain, biotisasi pada bahan kultur jaringan berpotensi mendukung pertumbuhan dan adaptasi plantlet (Lim et al., 2023), sedangkan pendekatan biokontrol menunjukkan potensi perlindungan terhadap *Ganoderma boninense* (Darlis et al., 2023). Berdasarkan perkembangan tersebut, kebaruan review ini terletak pada sintesis lintas-tahap yang menghubungkan faktor kultur dan genotipe dengan mekanisme fisiologis-molekuler, transformasi genetik, konservasi, biotisasi, biokontrol, serta kualitas regeneran dari fase *in vitro* menuju pasca aklimatisasi.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, review ini bertujuan untuk menganalisis faktor penentu keberhasilan embriogenesis somatik dan regenerasi kelapa sawit, menjelaskan peran genotipe serta mekanisme fisiologis dan molekuler dalam menentukan kompetensi embriogenik, serta mengevaluasi kontribusi teknologi pendukung seperti transformasi genetik, kriopreservasi, biotisasi, dan biokontrol. Kajian ini penting untuk mengintegrasikan perkembangan pengetahuan yang masih tersebar dan mengidentifikasi prioritas penelitian guna mendukung pengembangan protokol bioteknologi kelapa sawit yang lebih efisien, stabil, adaptif terhadap genotipe, dan aplikatif dalam penyediaan bahan tanam unggul.

Bahan dan Metode

Sumber data dan bahan review

Artikel ini merupakan review naratif sistematis berbasis artikel. Pendekatan literature review digunakan untuk memetakan perkembangan riset, mengelompokkan pola temuan, dan mengidentifikasi celah riset dari literatur yang tersedia (Snyder, 2019). Alur seleksi dan pelaporan literatur disusun secara transparan dengan menyesuaikan prinsip PRISMA 2020, terutama pada tahap identifikasi, penyaringan, ekstraksi, dan sintesis data (Page et al., 2021).

Tabel 1. Fokus review, pertanyaan penelitian, dan kata kunci pencarian

Komponen	Rumusan	Keterangan
Topik spesifik	Integrasi kultur jaringan, embriogenesis somatik, dan bioteknologi molekuler untuk pemuliaan kelapa sawit.	Tema utama diambil dari dominasi abstrak tentang oil palm tissue culture, somatic embryogenesis, transformation, dan breeding.
RQ1	Faktor kultur apa yang paling menentukan keberhasilan induksi kalus, embriogenesis, dan regenerasi?	Mencakup jenis eksplan, posisi daun, media, zat pengatur tumbuh, sistem kultur, dan tutup botol.
RQ2	Bagaimana genotipe, hormon, epigenetik, dan transkriptomik menjelaskan variasi respons embriogenesis?	Mencakup DEGs, DNA metilasi, akumulasi IAA, gen embroid, dan biomarker.
RQ3	Teknologi pendukung apa yang memperkuat pemuliaan dan konservasi kelapa sawit?	Mencakup transformasi genetik, genome editing/cisgenesis, kriopreservasi, biotisasi, dan biokontrol.
Kata kunci	oil palm; <i>Elaeis guineensis</i> ; tissue culture; somatic embryogenesis; callus induction; genetic transformation; transcriptome; cryopreservation; biotization; <i>Ganoderma boninense</i> .	Kata kunci dapat dikombinasikan dengan Boolean AND/OR untuk pencarian lanjutan.

Sumber data berupa artikel jurnal internasional yang tersedia dalam dokumen bahan. Fokus review ditetapkan pada integrasi kultur jaringan, embriogenesis somatik, dan bioteknologi molekuler untuk mendukung pemuliaan kelapa sawit. Pertanyaan review dan kata kunci pencarian disusun untuk membatasi ruang lingkup kajian, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Setiap artikel diekstraksi berdasarkan penulis, objek/fokus, metode atau pendekatan, variabel utama, temuan, serta keterbatasan yang dapat disimpulkan dari artikel. Hasil ekstraksi dikelompokkan ke dalam enam tema: (1) pemuliaan dan genomik, (2) embriogenesis somatik dan regenerasi, (3) determinan genotipe, seluler, hormonal, dan epigenetik, (4)

transformasi genetik dan *transformed-calli*, (5) konservasi, germinasi, dan kriopreservasi, serta (6) interaksi mikroba dan biokontrol. Sintesis dilakukan secara tematik dan kritis dengan membandingkan pola umum, perbedaan hasil, keterbatasan metodologi, dan research gap antarartikel. Hasil ekstraksi menunjukkan bahwa literatur yang direview mencakup kajian pemuliaan modern, embriogenesis somatik, transformasi genetik, kriopreservasi, biotisasi, biokontrol, serta pembandingan pada date palm.

Berdasarkan pengelompokan tematik, artikel-artikel tersebut memperlihatkan enam pola utama yang saling berkaitan. Pola temuan tersebut diringkas pada Tabel 2 untuk memperjelas posisi setiap kelompok literatur terhadap tujuan review.

Tabel 2. Sintesis tematik hasil review

Tema	Artikel terkait	Pola temuan	Makna untuk artikel review
Pemuliaan dan genomik	Martin et al., 2024; Rauf et al., 2025; Astari et al., 2022; Sahara et al.2023	Pemuliaan modern bergerak dari seleksi fenotipe ke integrasi genomik, transkriptomik, dan transformasi.	Percepatan breeding perlu basis molekuler sekaligus validasi agronomis.
Embriogenesis somatik dan regenerasi	Gomes et al., 2024; Yusnita & Hapsoro., 2011; Sinta et al., 2023; Astari et al., 2024; Setiawati et al.,2024	Respons kultur dipengaruhi eksplan, media, sistem kultur, tutup botol, makronutrien, dan genotipe.	Standardisasi tidak cukup satu protokol; perlu protokol adaptif berbasis genotipe.

Tema	Artikel terkait	Pola temuan	Makna untuk artikel review
Epigenetik, hormon, dan respons seluler	Sahara <i>et al.</i> , 2023; Silva-Cardoso <i>et al.</i> , 2022; Gomes <i>et al.</i> , 2024	IAA, ABA, brassinosteroid, auksin transporter, dan status DNA metilasi berkaitan dengan kapasitas embriogenesis.	Biomarker awal dapat dipakai untuk memilih ortet responsif dan mengurangi trial-and-error.
Konservasi dan kualitas klon	Wei <i>et al.</i> , 2023; Gomes <i>et al.</i> , 2024; Solangi <i>et al.</i> , 2025; de Araújo Silva-Cardoso <i>et al.</i> , 2022	Kriopreservasi dan uji fidelitas penting untuk menjaga materi genetik; validasi lapang dibutuhkan untuk membuktikan stabilitas.	Kultur jaringan harus dikawal dari laboratorium sampai lapangan.
Interaksi mikroba dan kesehatan tanaman	Darlis <i>et al.</i> , 2024; Hidayat <i>et al.</i> , 2024; Suryanti <i>et al.</i> , 2024	PGPR dan polypore non-patogenik berpotensi memperkuat pertumbuhan, aklimatisasi, dan perlindungan dari patogen.	Produksi bibit unggul perlu memasukkan aspek mikrobioma dan ketahanan penyakit.
Pembandingan palma	Sinta <i>et al.</i> , 2023; Abdel Ghaffar <i>et al.</i> , 2023; Solangi <i>et al.</i> , 2025	Date palm menunjukkan pola serupa: respons varietas, sumber eksplan, media, dan evaluasi lapang menentukan keberhasilan.	Pembelajaran lintas palma dapat memperkuat rancangan protokol kelapa sawit.

Hasil dan Pembahasan

Embriogenesis somatik sebagai platform utama pemuliaan

Dari seluruh literatur yang dikaji, embriogenesis somatik muncul sebagai simpul utama yang menghubungkan perbanyakan klonal, transformasi genetik, konservasi, dan seleksi bahan tanam. Kajian Martin *et al.* (2022) menempatkan bioteknologi sebagai pelengkap pemuliaan konvensional yang lambat, sedangkan Rauf *et al.* (2025) menegaskan bahwa regenerasi melalui embriogenesis somatik merupakan prasyarat penting bagi keberhasilan tanaman transgenik. Dengan demikian, peningkatan efisiensi embriogenesis bukan hanya persoalan produksi bibit, tetapi juga fondasi bagi pemuliaan presisi.

Studi Yusnita & Hapsoro (2011) serta Gomes *et al.* (2024) menunjukkan bahwa induksi kalus dan regenerasi dapat dimodulasi melalui kombinasi media, auksin, sitokinin, arang aktif, dan sistem kultur. Namun, respons yang diperoleh masih tidak seragam. Gomes *et al.* (2024) melaporkan bahwa posisi daun L4, L5, dan L7 lebih responsif dibanding bagian lain, sementara sistem RITA (*Recipient for Automated Temporary Immersion*) memberikan hasil regenerasi tinggi dan menunjukkan stabilitas genetik/epigenetik lebih baik. Temuan ini

memperlihatkan bahwa pemilihan sumber eksplan dan lingkungan kultur sama pentingnya dengan formulasi media.

Optimasi fase tunas juga penting. Sinta *et al.* (2023) menunjukkan bahwa sistem double-layer yang dikombinasikan dengan GA3(*Gibberellic Acid*), TDZ(*Thidiazuron*), makronutrien ganda, dan tutup botol polypropylene dapat meningkatkan tinggi tunas serta menurunkan *shoot tip necrosis*. Ini berarti keberhasilan kultur jaringan tidak berhenti pada pembentukan embrio somatik; mutu plantlet pada tahap pemanjangan tunas, perakaran, dan aklimatisasi harus diposisikan sebagai bagian dari satu rantai protokol.

Genotipe, hormon, dan epigenetik sebagai penentu respons kultur

Salah satu pola paling kuat adalah pengaruh genotipe. Astari *et al.* (2024) menemukan perbedaan nyata antar genotipe pada induksi kalus, pembentukan embrio somatik, dan germinasi embrio, dengan GE-27 sebagai genotipe yang paling responsif. Hasil ini sejalan dengan studi pembandingan pada date palm yang menunjukkan bahwa varietas Ajwa, Jarvis, Amri, Magdoul, dan Barhy memiliki tingkat respons berbeda terhadap media dan sumber eksplan (Sinta *et al.*, 2023; Abdelghaffar *et al.*, 2023).

Artinya, protokol kultur tidak dapat diasumsikan universal untuk semua genotipe palma.

Pendekatan molekuler mulai menjelaskan mengapa respons tersebut berbeda. Sahara *et al.* (2023) mengidentifikasi 1.911 *differentially expressed genes* antara ortet Tenera dengan laju embriogenesis tinggi dan rendah. Gen terkait ABA (*Abscisic Acid*), brassinosteroid, dan auksin menunjukkan pola ekspresi yang berbeda pada ortet embriogenik tinggi. Silva-Cardoso *et al.* (2022) menambahkan bukti pada level seluler dan epigenetik: pembentukan kalus terkait sel prokambial, akumulasi IAA (*Indole-3-Acetic Acid*), dan hipometilasi DNA, sedangkan genotipe non-responsif berhubungan dengan hipermetilasi.

Temuan tersebut memberi arah baru bahwa seleksi bahan tanam untuk kultur jaringan sebaiknya tidak hanya berdasarkan performa fenotipe lapang, tetapi juga berdasarkan indikator awal seperti profil ekspresi gen, status metilasi DNA, dan respons hormonal. Dengan pendekatan ini, laboratorium dapat mengurangi percobaan berulang yang mahal dan lama, sekaligus meningkatkan peluang keberhasilan regenerasi.

Transformasi genetik dan transformed-calli

Transformasi genetik, cisgenesis, dan genome editing menawarkan peluang untuk memperbaiki sifat yang sulit dicapai melalui pemuliaan konvensional, seperti toleransi cekaman, ketahanan penyakit, efisiensi fisiologis, komposisi minyak, dan fenologi. Akan tetapi, Rauf *et al.* (2025) menekankan bahwa keberhasilan transformasi tetap sangat bergantung pada sistem regenerasi yang kuat. Dengan kata lain, transformasi tidak dapat dipisahkan dari embriogenesis somatik.

Masalah ini tampak jelas pada studi Setiawati *et al.* (2024) tentang *un-regenerated transformed callus*. Walaupun integrasi T-DNA dapat dideteksi melalui gen NPTII (Neomycin Phosphotransferase II), tidak semua kalus mampu kembali ke jalur regenerasi. Perlakuan glutamine, cysteine-putrescine, dan ascorbic acid-cysteine dapat memperbaiki tipe callus tertentu, tetapi tipe lain tetap tidak responsif. Ini menunjukkan bahwa *transformed-calli* merupakan sistem biologis yang heterogen, sehingga pemulihan regenerasi perlu

mempertimbangkan kondisi oksidatif, status metabolik, dan morfologi callus.

Konservasi plasma nutfah, germinasi, dan mutu klon

Selain regenerasi, keberlanjutan pemuliaan membutuhkan konservasi plasma nutfah dan penyediaan benih/bibit yang stabil. Wei *et al.* (2023) memperlihatkan bahwa kriopreservasi embrio zigotik dapat mencapai viabilitas dan germinasi tinggi melalui pengeringan udara sederhana, sementara kalus embriogenik membutuhkan perlakuan sukrosa dan PVS2 (*Plant Vitrification Solution 2*). Perbedaan respons ZE (*Zygotic Embryo*) dan EC (*Embryogenic Callus*) memperlihatkan bahwa jaringan yang lebih terdiferensiasi dan jaringan kultur memiliki sensitivitas oksidatif berbeda.

Pada sisi benih, Cui *et al.* (2020) menegaskan bahwa germinasi kelapa sawit masih menjadi proses yang sulit, lambat, dan sering menghasilkan tingkat germinasi lebih rendah dari harapan. Review tersebut menempatkan metabolisme biji sebagai bidang yang belum cukup dipahami. Jika dikaitkan dengan kultur jaringan, hal ini memperluas agenda riset: produksi bahan tanam kelapa sawit tidak hanya perlu memperbaiki klon *in vitro*, tetapi juga memahami fisiologi biji untuk mendukung penyediaan populasi breeding dan konservasi.

Mutu klon perlu dibuktikan hingga lapangan. Studi Solangi *et al.* (2025) pada date palm menunjukkan bahwa tanaman asal kultur jaringan dapat memiliki atribut vegetatif dan buah yang relatif sebanding dengan tanaman dari offshoot setelah lima tahun. Walaupun bukan kelapa sawit, temuan ini memberi pelajaran penting bahwa klaim keberhasilan kultur jaringan pada palma harus dilanjutkan dengan validasi *field performance* jangka panjang.

Interaksi mikroba dan kesehatan tanaman

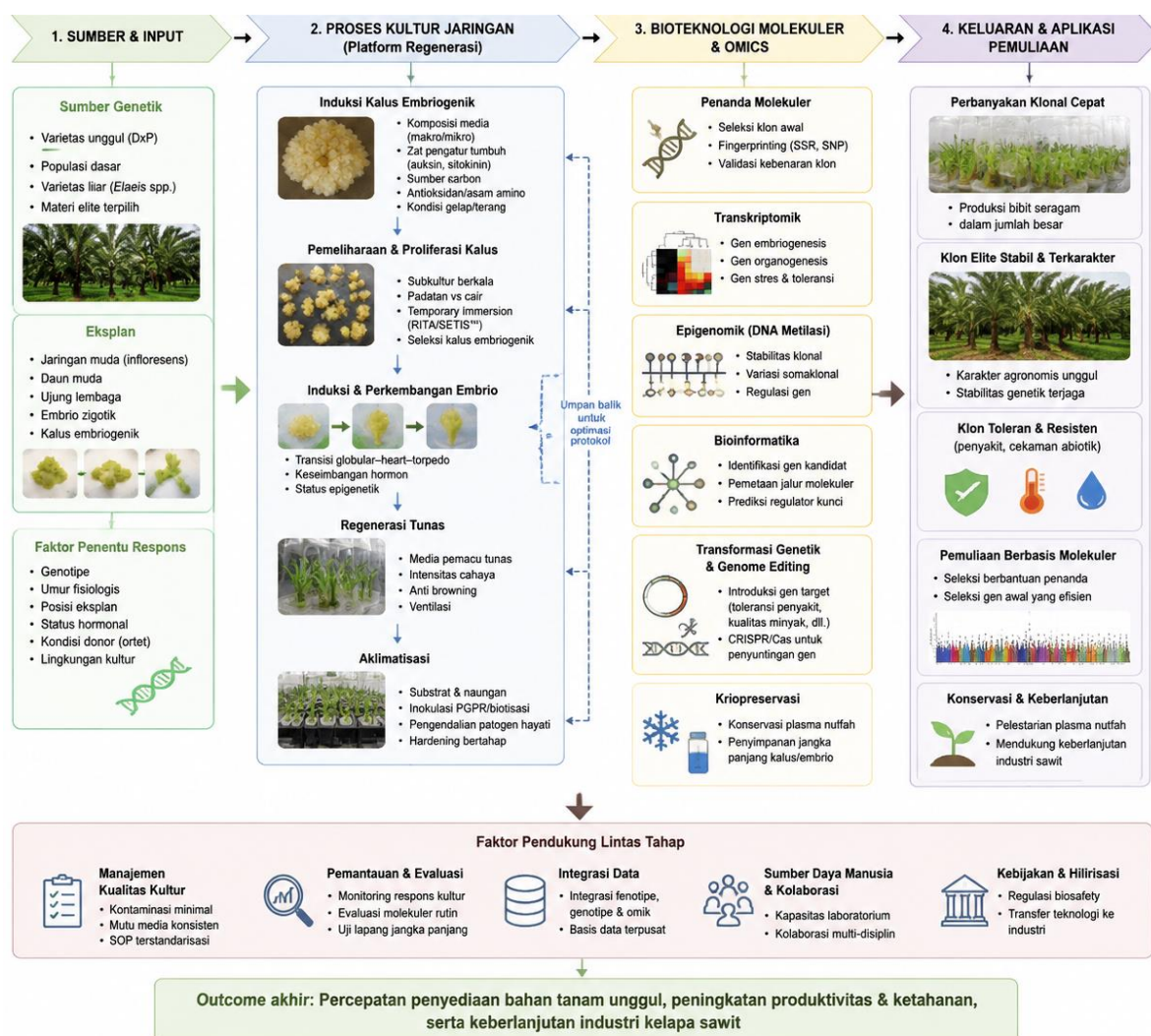
Fokus review tidak hanya pada sel tanaman, tetapi juga pada lingkungan biologis yang menyertainya. Artikel tentang biotisasi menunjukkan bahwa PGPR (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) dapat diinokulasikan ke bahan kultur, seperti callus, *embryogenic callus*, dan plantlet, untuk membentuk interaksi yang mendukung pertumbuhan serta toleransi terhadap stres. Pendekatan ini menarik karena

salah satu titik rawan kultur jaringan adalah transisi dari lingkungan *in vitro* ke aklimatisasi dan pre-nursery.

Sementara itu, Darlis *et al.* (2023) menunjukkan potensi polypore fungi non-patogenik sebagai agen antagonis terhadap *Ganoderma boninense*, penyebab basal stem rot. Isolat SRP11, SRP17, dan SRP18 memiliki nilai penghambatan yang relatif tinggi pada uji *in vitro*. Bagi pemuliaan, informasi ini penting karena produktivitas bahan tanam tidak hanya ditentukan oleh potensi genetik, tetapi juga oleh kemampuan bertahan dari penyakit utama di lapangan.

Sintesis konseptual

Berdasarkan sintesis literatur, keberhasilan bioteknologi kelapa sawit dapat dipahami sebagai interaksi lima komponen: genotipe dan sumber eksplan, mikro-lingkungan kultur, respons seluler-molekuler, sistem regenerasi dan validasi fidelitas, serta keluaran pemuliaan (Gambar 1). Model ini menempatkan kultur jaringan sebagai pusat, tetapi tidak berdiri sendiri, yang dipengaruhi oleh faktor genetik, fisiologis, epigenetik, mikroba, dan teknis.



Gambar 1. Kerangka konseptual integratif kultur jaringan, embriogenesis somatik, dan bioteknologi molekuler untuk percepatan pemuliaan kelapa sawit.

Arah hubungan model bersifat bertahap: input genetik dan eksplan menentukan potensi awal; mikro-lingkungan kultur mengarahkan

perubahan fisiologis; respons seluler-molekuler menjadi indikator keberhasilan; regenerasi dan kontrol mutu memastikan stabilitas; dan keluaran

pemuliaan baru dapat dinilai utuh setelah uji lapang. Model ini juga menunjukkan bahwa kegagalan pada satu tahap, misalnya browning *transformed-calli* atau hipermetilasi DNA, dapat memutus rantai keberhasilan hingga tahap produksi bibit.

Implikasi teoretis dan praktis

Secara teoretis, review ini memperkuat pandangan bahwa embriogenesis somatik kelapa sawit bukan sekadar proses morfogenesis *in vitro*, melainkan proses perkembangan yang dikendalikan oleh interaksi genotipe, hormon, epigenetik, metabolisme oksidatif, dan mikro-lingkungan kultur. Temuan tentang DEG (*Differentially expressed genes*), hipometilasi DNA, akumulasi IAA, dan ROS (*Reactive oxygen species*) menunjukkan bahwa respons kultur perlu dipahami sebagai sistem regulasi multi-level. Dengan demikian, teori regenerasi tanaman palma perlu bergerak dari model berbasis media menuju model integratif berbasis genotipe-sel-lingkungan.

Secara praktis, laboratorium kultur jaringan perlu melakukan screening genotipe sebelum produksi massal, bukan hanya mengandalkan protokol umum. Sistem *temporary immersion*/RITA dan double-layer layak dipertimbangkan untuk meningkatkan regenerasi dan pertumbuhan tunas, dengan evaluasi biaya dan skala produksi. Penggunaan marker molekuler, analisis metilasi, dan kandidat biomarker transkriptomik dapat mempercepat seleksi ortet yang responsif. *Transformed-calli* perlu diperlakukan berdasarkan tipe morfologi dan kondisi fisiologisnya, termasuk pengendalian browning dan stres oksidatif. Program pemuliaan perlu menghubungkan hasil kultur jaringan dengan uji fidelitas, kriopreservasi, biotisasi, ketahanan penyakit, dan performa lapangan.

Standardisasi protokol lintas genotipe masih lemah. Banyak studi menunjukkan keberhasilan pada genotipe atau varietas tertentu, tetapi belum menjawab apakah protokol tersebut stabil pada populasi breeding yang luas. Validasi biomarker embriogenesis perlu diperluas. DEG, gen embroid, status metilasi, dan akumulasi hormon menjanjikan, tetapi perlu diuji sebagai alat seleksi rutin. Regenerasi *transformed-calli* masih menjadi hambatan. Perlu pendekatan yang menggabungkan antioksidan, metabolomik,

histologi, dan optimasi media berdasarkan tipe callus. Kualitas klon perlu dilacak jangka panjang. Evaluasi fidelitas molekuler harus dilengkapi dengan observasi abnormalitas bunga, produktivitas, dan stabilitas sifat di lapangan. Biotisasi dan biokontrol perlu diuji pada skala nursery dan lapangan. Interaksi mikroba yang menjanjikan di laboratorium harus dibuktikan stabil pada lingkungan produksi. Kriopreservasi kalus embriogenik perlu ditingkatkan. Viabilitas EC lebih rendah daripada ZE, sehingga mekanisme stres oksidatif dan osmoproteksi perlu menjadi fokus riset.

Kesimpulan

Kultur jaringan, terutama embriogenesis somatik, merupakan pusat pengembangan bahan tanam unggul dan pemuliaan modern kelapa sawit. Keberhasilan proses tersebut sangat dipengaruhi oleh genotipe, sumber eksplan, komposisi media, sistem kultur, status hormon, epigenetik, serta pengendalian stres oksidatif. Sistem RITA, double-layer, formulasi ZPT tertentu, dan penguatan makronutrien menunjukkan potensi untuk meningkatkan regenerasi dan mutu plantlet.

Pendekatan molekuler seperti bioinformatika gen embroid, transkriptomik, analisis DNA metilasi, dan marker fidelitas memberi dasar untuk mengurangi trial-and-error dalam kultur jaringan. Sementara itu, transformasi genetik, kriopreservasi, biotisasi, dan biokontrol memperluas fungsi kultur jaringan dari sekadar perbanyakan menjadi platform pemuliaan, konservasi, dan perlindungan tanaman. Namun, penerapan luas masih membutuhkan validasi lintas genotipe, perbaikan regenerasi *transformed-calli*, dan evaluasi lapangan jangka panjang.

Rekomendasi utama dari review ini adalah membangun protokol pemuliaan kelapa sawit yang integratif, memilih genotipe responsif, mengoptimalkan sistem kultur, memantau biomarker seluler-molekuler, memastikan fidelitas klon, menguji performa lapangan, serta memadukan perlindungan biologis sejak fase bibit. Dengan pendekatan tersebut, bioteknologi kelapa sawit dapat lebih efektif mendukung penyediaan bahan tanam unggul, stabil, dan adaptif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Biologi, Universitas Riau atas dukungan akademik dalam penyusunan artikel review ini.

Referensi

- Abdelghaffar, A. M., Soliman, S. S., Ismail, T. A., Alzohairy, A. M., Latef, A. A. H. A., Alharbi, K., Al-Khayri, J. M., Aljuwayzi, N. I. M., El-Moneim, D. A., & Hassanin, A. A. (2023). In vitro propagation of three date palm (*Phoenix dactylifera* L.) varieties using immature female inflorescences. *Plants*, 12(3), 644. <https://doi.org/10.3390/plants12030644>
- Astari, R. P., Basyuni, M., Siregar, L. A. M., & Damanik, R. I. M. (2022). Bioinformatics analyses of embryoid genes in oil palm tissue culture (*Elaeis guineensis* Jacq.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1115(1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1115/1/012034>
- Astari, R. P., Basyuni, M., Siregar, L. A. M., Damanik, R. I. M., Arifiyanto, D., Affandi, D., & Syahputra, I. (2024). Genotypic effects on accelerated propagation of oil palm breeding materials selected (*Elaeis guineensis* Jacq.) using somatic embryogenesis. *Oil Crop Science*, 9(2), 111–120. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2024.03.005>
- Babu, B. K., Mathur, R. K., Suresh, K., Ravichandran, G., Susanthi, B., Patil, G. B., Ruthweek, N., & Mahesh, M. (2025). Efficient regeneration protocol for producing true-to-type oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) through somatic embryogenesis from immature male inflorescence. *Heliyon*, 11(1), Article e41479. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41479>
- Balzon, T. A., Monteiro, T. R., Lopes, R., da Cunha, R. N. V., Gomes, H. T., de Araújo Silva-Cardoso, I. M., ... & Scherwinski-Pereira, J. E. (2026). Clonal propagation of segregating genotypes through somatic embryogenesis from zygotic embryos in an interspecific oil palm backcross. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 165(3), 79. <https://doi.org/10.1007/s11240-026-03498-9>
- Cui, J., Lamade, E., & Tcherkez, G. (2020). Seed germination in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.): A review of metabolic pathways and control mechanisms. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(17), Article 6175. <https://doi.org/10.3390/ijms21176175>
- Darlis, D., Jalloh, M. B., Chin, C. F. S., Basri, N. K. M., Besar, N. A., Ahmad, K., & Rakib, R. M. (2023). Exploring the potential of Bornean polypore fungi as biological control agents against pathogenic *Ganoderma boninense* causing basal stem rot in oil palm. *Scientific Reports*, 13(1), Article 10316. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37507-0>
- de Araújo Silva-Cardoso, I. M., Gomes, A. C. M. M., & Scherwinski-Pereira, J. E. (2022). Cellular responses of oil palm genotypes during somatic embryogenesis involve participation of procambial cells, DNA demethylation, and auxin accumulation. *Plant cell reports*, 41(9), 1875–1893. <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02898-3>
- Gomes, H. T., Machado, L. G., Bartos, P. M. C., Balzon, T. A., Costa, F. H. D. S., Azevedo, V. C. R., Cardoso, I. M. D. A. S., de Souza, A. L. X., Inglis, P. W., & Scherwinski-Pereira, J. E. (2024). Somatic embryogenesis in oil palm from immature leaves with emphasis on leaf position, sequential callus re-collection, use of temporary immersion system, and assessment of genetic and epigenetic fidelity of the resulting clones. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 156(1), Article 32. <https://doi.org/10.1007/s11240-023-02630-3>
- Hidayat, F., Pane, R. D. P., Sapalina, F., Listia, E., Koga, T., Winarna, ... & Tashiro, Y. (2024). Long-term application of organic matter improves soil properties and plant growth-promoting bacteria in soil communities of oil palm plantation. *Soil*

- Science and Plant Nutrition, 70(5-6), 393-405.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2380881>
- Karyanti, Sriherwanto, C., Nurlaila, Khairiyah, H., Sukarnih, T., Rudiyan, Y., & Wibowo, C. S. (2024). Endogenous hormones from the young leaves of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.): A response to in vitro callus and embryoid induction. *Journal of Oil Palm Research*, 36(1), 63–74.
<https://doi.org/10.21894/jopr.2023.0002>
- Khianchaikhan, K., Aroonluk, S., Phaonakrop, N., Roytrakul, S., Suksirt, M., Pinyokham, P., Thuzar, M., & Jantasuriyarat, C. (2023). Proteomics of oil palm somatic embryogenesis reveals the differentially expressed proteins as candidates for biomarker development. *Journal of Oil Palm Research*, 35(3), 528–537.
<https://doi.org/10.21894/jopr.2022.0062>
- Lim, S. L., Subramaniam, S., & Mia, M. A. B. (2023). Biotization of in vitro oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) and its plant-microbe interactions. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1150309.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1150309>
- Martin, J. J. J., Yarra, R., Wei, L., & Cao, H. (2022). Oil palm breeding in the modern era: Challenges and opportunities. *Plants*, 11(11), 1395.
<https://doi.org/10.3390/plants11111395>
- Meira, R. O., dos Santos Neves, J., de Araújo Silva-Cardoso, I. M., da Cunha, R. N. V., Lopes, R., de Souza, A. L. X., & Scherwinski, J. (2025). Dual-phase culture system as a promising strategy to enhance the efficiency of somatic embryogenesis and plant regeneration in oil palm (*Elaeis oleifera* × *E. guineensis*). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 162, 51.
<https://doi.org/10.1007/s11240-025-03154-8>
- Oliveira, L. B., Motoike, S. Y., Martins Filho, S., Kuki, K. N., de Melo, L. A., & Rocha, D. I. (2024). Silicon supplementation increases the in vitro regeneration of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) somatic embryos. *Ciência e Agrotecnologia*, 48, Article e019223.
<https://doi.org/10.1590/1413-7054202448019223>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L. A., Stewart, L. A., Thomas, J., Tricco, A. C., Welch, V. A., Whiting, P., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, Article n71.
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rauf, S., Ortiz, R., Al-Khayri, J. M., & Wang, Y. (2025). Achievements and limitations in genetic transformation and regeneration of oil palm: Some molecular aspects. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 162, 19.
<https://doi.org/10.1007/s11240-025-03130-2>
- Sahara, A., Roberdi, R., Wiendi, N. M. A., & Liwang, T. (2023). Transcriptome profiling of high and low somatic embryogenesis rate of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq. var. Tenera). *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1142868.
- Setiawati, Y., Riyadi, I., Sari, D. A., Saptari, R. T., Sinta, M. M., Minarsih, H., Turhadi, & Putranto, R. A. (2024). Characterization and morphological development of oil palm transformed callus on modified culture media. *Menara Perkebunan*, 92(2), 150–158.
<https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v92i2.576>
- Silva-Cardoso, I. M. D. A., Mendes Gomes, A. C., & Scherwinski-Pereira, J. E. (2022). Cellular responses of oil palm genotypes during somatic embryogenesis involve participation of procambial cells, DNA demethylation, and auxin accumulation. *Plant Cell Reports*, 41(5), 1275–1288.
<https://doi.org/10.1007/s00299-022-02898-3>
- Sinta, M. M., Saptari, R. T., Riyadi, I., & Sumaryono. (2023a). Optimasi sistem kultur dan media untuk peningkatan tinggi tunas in vitro kelapa sawit. *Menara Perkebunan*, 91(1), 25–35.

-
- <https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v9i1.1.511>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Solangi, N., Mirani, A. A., Jatoi, M. A., Abul-Soad, A. A., Bhanbhro, L. B., Markhand, G. S., Hedayat, M., & Abdi, G. (2025). Field evaluation of tissue culture-derived and offshoot-grown date palm cultivars: A comparative analysis of vegetative and fruit attributes. *Frontiers in Plant Science*, 16, Article 1516983. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1516983>
- Suryanti, P., Ayu, I., Purnamasari, M. I., Prihatna, C., Rusmana, I., Wahyudi, A. T., & Suwanto, A. (2024). Characterization of endophytic bacterial isolates from oil palm (*Elaeis guineensis*) seedlings and ramets for their plant growth promoting potential. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, 25(10), 3775. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d251040>
- Wei, Q., Shi, P., Khan, F. S., Htwe, Y. M., Zhang, D., Li, Z., & Wei, X. (2023). Cryopreservation and cryotolerance mechanism in zygotic embryo and embryogenic callus of oil palm. *Forests*, 14(6), Article 966. <https://doi.org/10.3390/f14060966>
- Yusnita, & Hapsoro, D. W. I. (2011). In vitro callus induction and embryogenesis of oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) from leaf explants. *HAYATI Journal of Biosciences*, 18(2), 61–65. <https://doi.org/10.4308/hjb.18.2.61>
- Zou, J., Zhang, Q., Zhu, Z., Gao, L., Zheng, Y., & Li, D. (2019). Embryogenic callus induction and fatty acid composition analysis of oil palm (*Elaeis guineensis* cv. Tenera). *Scientia Horticulturae*, 254, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.042>