



Pemanfaatan DNA Rekombinan Dalam Produksi Protein Dan Obat Modern

Nur Alvi Oktavia¹, Bintang Nur Azmi², Heni Novianti³, Reva Marani⁴

^{1,2,3,4}Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung
¹nuralvioktavia1@gmail.com, ²bintangnurazmi@gmail.com, ³heninovianti1306@gmail.com, ⁴revamarani27@gmail.com

Abstrak

Teknologi DNA rekombinan merupakan salah satu inovasi utama dalam bidang bioteknologi modern yang berperan penting dalam produksi protein dan obat-obatan secara efisien, spesifik, dan dalam skala besar. Perkembangan teknologi ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan akan produk biofarmaka yang aman, berkualitas tinggi, serta mampu memenuhi kebutuhan medis global yang terus berkembang. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pemanfaatan teknologi DNA rekombinan dalam produksi protein terapeutik dan obat modern, serta mengidentifikasi keunggulan dan tantangan dalam penerapannya. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah studi literatur dengan mengkaji berbagai jurnal ilmiah nasional dan internasional terbaru yang relevan dengan topik penelitian. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi DNA rekombinan telah berhasil diaplikasikan secara luas dalam produksi berbagai produk biofarmaka seperti insulin rekombinan, antibodi monoklonal, vaksin rekombinan, serta enzim terapeutik. Teknologi ini memiliki keunggulan dalam hal efisiensi produksi, tingkat kemurnian yang tinggi, serta keamanan yang lebih baik dibandingkan metode konvensional berbasis sumber hewani. Selain itu, teknologi ini juga memungkinkan rekayasa protein sesuai kebutuhan terapi sehingga meningkatkan efektivitas pengobatan. Namun demikian, terdapat beberapa tantangan dalam penerapannya, seperti tingginya biaya produksi, kompleksitas proses pemurnian, serta regulasi yang ketat dalam industri farmasi. Dengan perkembangan teknologi yang semakin pesat, DNA rekombinan memiliki peran strategis sebagai pilar utama dalam industri biofarmasi modern dan berpotensi terus berkembang di masa depan.

Kata Kunci: DNA Rekombinan, Protein Terapeutik, Biofarmaka, Bioteknologi, Obat Modern.

1. Pendahuluan

Perkembangan bioteknologi modern telah mengalami kemajuan yang sangat pesat dalam beberapa dekade terakhir dan memberikan kontribusi besar dalam bidang kesehatan, khususnya dalam pengembangan protein terapeutik dan obat-obatan berbasis biologis (Walsh, 2022). Salah satu teknologi yang menjadi dasar utama dalam kemajuan tersebut adalah teknologi DNA rekombinan, yaitu teknik manipulasi genetik yang memungkinkan penggabungan DNA dari berbagai sumber untuk menghasilkan protein spesifik dengan efisiensi tinggi (Rosano & Ceccarelli, 2023). Perkembangan ini menunjukkan integrasi ilmu biologi molekuler dan rekayasa genetika dalam bidang kesehatan. Kemajuan tersebut juga mendorong lahirnya berbagai inovasi dalam pengembangan produk bioteknologi. Dengan demikian, bioteknologi modern menjadi salah satu pilar penting dalam ilmu kesehatan saat ini. Teknologi ini telah merevolusi industri farmasi dengan memungkinkan produksi protein terapeutik dalam jumlah besar yang sebelumnya sulit diperoleh melalui metode konvensional (Tripathi & Shrivastava, 2023). Produk-produk seperti insulin rekombinan, antibodi monoklonal, hormon pertumbuhan, dan vaksin rekombinan telah menjadi bagian penting dalam terapi berbagai penyakit kronis dan infeksi (Liu et al., 2024). Hal ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam efisiensi produksi obat berbasis protein. Selain itu, proses produksi dapat dilakukan dalam sistem biologis yang lebih terkontrol. Kondisi ini mendukung ketersediaan terapi yang lebih luas bagi pasien.

Teknologi DNA rekombinan juga memberikan keunggulan dalam hal keamanan dan spesifisitas karena produk yang dihasilkan memiliki struktur yang identik atau sangat mirip dengan protein manusia alami, sehingga mengurangi risiko reaksi imunologis (Walsh, 2022). Dalam konteks global, kebutuhan terhadap biofarmaka terus meningkat seiring dengan meningkatnya prevalensi penyakit kronis dan berkembangnya teknologi medis (Krammer, 2023). Keunggulan ini menjadikan teknologi tersebut semakin banyak digunakan dalam pengembangan obat modern. Peningkatan kebutuhan biofarmaka juga dipengaruhi oleh perubahan pola penyakit global. Oleh sebab itu, inovasi dalam bidang ini terus berkembang secara berkelanjutan. Penerapan teknologi DNA

rekombinan masih menghadapi berbagai tantangan, seperti tingginya biaya produksi, kompleksitas proses ekspresi dan pemurnian protein, serta regulasi yang ketat dalam industri farmasi (Tripathi & Shrivastava, 2023). Selain itu, terdapat kesenjangan dalam penelitian terkait optimalisasi sistem ekspresi dan efisiensi produksi protein rekombinan dalam skala industri (Rosano & Ceccarelli, 2023). Kendala ini sering menjadi faktor penghambat dalam skala produksi industri. Diperlukan pendekatan teknologi yang lebih efisien untuk mengatasi permasalahan tersebut. Penelitian lanjutan sangat dibutuhkan untuk meningkatkan efektivitas sistem yang ada.

Perkembangan bioteknologi seluler memberikan kontribusi penting dalam dunia kedokteran modern melalui pemanfaatan sistem biologis tingkat sel untuk menghasilkan produk terapeutik yang lebih efektif (Noviantari & Khariri, 2020). Teknologi ini memungkinkan manipulasi sel untuk tujuan pengobatan dan regenerasi jaringan. Dalam praktiknya, pendekatan ini banyak digunakan dalam terapi penyakit degeneratif dan kanker. Pemanfaatan sel sebagai sistem produksi biologis juga meningkatkan presisi dalam pengembangan obat. Dengan demikian, teknologi ini menjadi pelengkap penting dalam bioteknologi modern. Bioteknologi molekuler dengan pendekatan DNA rekombinan telah lama menjadi dasar dalam pengembangan teknologi genetik modern yang mampu mengoptimalkan keanekaragaman hayati (Suwanto, 1998). Teknik ini memungkinkan pemindahan gen antar organisme untuk menghasilkan sifat baru yang bermanfaat. Selain itu, teknologi ini telah membuka peluang besar dalam produksi protein dan enzim industri. Pemanfaatannya tidak hanya terbatas pada bidang kesehatan, tetapi juga pertanian dan lingkungan. Oleh karena itu, DNA rekombinan menjadi fondasi penting dalam perkembangan bioteknologi.

Penerapan DNA rekombinan dalam terapi gen menunjukkan perkembangan signifikan dalam dunia medis modern karena mampu memperbaiki kelainan genetik secara langsung pada tingkat DNA (Ardandi et al., 2024). Teknologi ini memberikan harapan baru dalam pengobatan penyakit yang sebelumnya sulit disembuhkan. Selain itu, terapi gen memungkinkan pendekatan yang lebih personal terhadap pasien. Proses ini juga terus dikembangkan untuk meningkatkan tingkat keberhasilan dan keamanan klinis. Dengan demikian, terapi gen menjadi salah satu inovasi paling menjanjikan dalam bioteknologi medis. Perkembangan DNA rekombinan dan plasmid menjadi kunci utama dalam kemajuan bioteknologi modern yang mendukung berbagai inovasi di bidang kesehatan dan industri (Yaumie & Zahro, 2025). Plasmid berfungsi sebagai vektor penting dalam transfer gen ke dalam sel target. Teknologi ini memungkinkan produksi protein terapeutik secara lebih efisien dan terkontrol. Selain itu, kombinasi DNA rekombinan dan plasmid mempercepat proses rekayasa genetika. Oleh sebab itu, kedua komponen ini memiliki peran sentral dalam perkembangan bioteknologi saat ini. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara komprehensif pemanfaatan teknologi DNA rekombinan dalam produksi protein terapeutik dan obat modern, serta mengidentifikasi keunggulan dan tantangan yang dihadapi dalam implementasinya (Liu et al., 2024). Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai perkembangan teknologi tersebut. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi acuan dalam pengembangan strategi bioteknologi. Analisis juga mencakup aspek keunggulan dan keterbatasan yang ada saat ini. Dengan demikian, implementasi teknologi dapat lebih dioptimalkan di masa mendatang.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur (literature review) untuk mengkaji pemanfaatan teknologi DNA rekombinan dalam produksi protein dan obat modern (Snyder, 2019; Xiao & Watson, 2019). Metode studi literatur dipilih karena mampu menyajikan pemahaman komprehensif melalui sintesis berbagai temuan penelitian sebelumnya yang relevan (Walsh, 2022). Pendekatan penelitian berfokus pada pengolahan sumber ilmiah yang telah dipublikasikan secara sistematis dan terarah. Kajian literatur memberikan dasar konseptual yang kuat dalam memahami perkembangan teknologi biomedis modern. Evaluasi berbagai hasil penelitian dilakukan untuk memperoleh gambaran ilmiah yang lebih utuh. Hasil kajian diharapkan mampu menggambarkan perkembangan pemanfaatan DNA rekombinan secara menyeluruh. Sumber data penelitian berasal dari database jurnal ilmiah bereputasi seperti PubMed, ScienceDirect, SpringerLink, dan Google Scholar dengan kriteria inklusi artikel tahun 2020–2025 yang relevan dengan topik (Rosano & Ceccarelli, 2023). Penentuan sumber literatur dilakukan secara selektif untuk menjamin kualitas dan validitas informasi ilmiah yang digunakan. Kata kunci pencarian meliputi “recombinant DNA”, “therapeutic protein”, “biopharmaceutical”, dan “recombinant vaccine” (Tripathi & Shrivastava, 2023). Strategi pencarian literatur dirancang untuk memperoleh referensi yang spesifik dan sesuai dengan fokus kajian. Kriteria inklusi diterapkan untuk memastikan relevansi serta kebaruan data yang dianalisis. Seluruh sumber yang tidak memenuhi standar seleksi dieliminasi dari proses pengumpulan data penelitian.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui tahapan identifikasi literatur, seleksi judul dan abstrak, evaluasi isi artikel, serta klasifikasi berdasarkan topik (Liu et al., 2024). Setiap artikel melalui proses pemeriksaan mendalam untuk memastikan kesesuaian dengan fokus penelitian. Artikel yang tidak sesuai dengan kriteria penelitian dikeluarkan dari daftar analisis. Evaluasi isi artikel bertujuan menilai kontribusi ilmiah terhadap pengembangan kajian yang dilakukan. Pengelompokan data disusun berdasarkan tema-tema utama yang muncul dalam literatur (Krammer, 2023). Tahapan sistematis tersebut mendukung konsistensi dan ketepatan hasil penelitian yang

diperoleh. Analisis data menggunakan teknik analisis isi (content analysis) untuk mengidentifikasi pola, hubungan, serta tren perkembangan teknologi DNA rekombinan dalam industri biofarmasi (Rosano & Ceccarelli, 2023). Reduksi data dilakukan untuk menyederhanakan informasi yang berasal dari berbagai sumber ilmiah. Penyajian data disusun secara sistematis agar mudah dipahami dalam konteks penelitian yang sedang dikaji. Penarikan kesimpulan dilakukan berdasarkan hasil interpretasi terhadap temuan literatur yang telah dianalisis. Proses analisis mengikuti tahapan metodologis yang terstruktur untuk menjaga konsistensi hasil penelitian (Snyder, 2019). Validitas serta reliabilitas penelitian dipertahankan melalui pendekatan analisis yang objektif dan sistematis.

3. Hasil dan Pembahasan

1. Prinsip Teknologi DNA Rekombinan

Teknologi DNA rekombinan merupakan teknik manipulasi genetik yang melibatkan beberapa tahapan utama, yaitu isolasi gen target, penyisipan gen ke dalam vektor (plasmid), transformasi ke dalam sel inang, ekspresi protein, serta pemurnian produk (Rosano & Ceccarelli, 2023). Tahapan tersebut menghasilkan protein dalam jumlah besar dengan efisiensi tinggi dan kualitas yang stabil (Walsh, 2022). Isolasi gen dilakukan menggunakan enzim restriksi yang memotong DNA pada lokasi spesifik. Penyisipan gen ke dalam vektor berlangsung menggunakan enzim ligase untuk membentuk DNA rekombinan (Tripathi & Shrivastava, 2023). Proses tersebut menjadi dasar utama dalam rekayasa genetika modern. Sistem ini mendukung pengembangan berbagai produk bioteknologi berbasis protein.

Vektor rekombinan dimasukkan ke dalam sel inang melalui proses transformasi atau transfeksi sesuai jenis sel yang digunakan. Gen target dalam sel inang mengalami ekspresi melalui mekanisme transkripsi dan translasi (Liu et al., 2024). Protein hasil ekspresi kemudian diproduksi sesuai instruksi genetik yang telah disisipkan sebelumnya. Tahap pemurnian protein dilakukan untuk memperoleh produk dengan tingkat kemurnian tinggi (Walsh, 2022). Proses pemurnian menghilangkan kontaminan yang tidak diinginkan dalam hasil akhir produksi. Keberhasilan tahap ini menentukan kualitas protein terapeutik yang dihasilkan.

Sistem ekspresi protein rekombinan mencakup bakteri *Escherichia coli*, ragi *Pichia pastoris*, dan sel mamalia seperti CHO (Chinese Hamster Ovary cells) (Tripathi & Shrivastava, 2023). Setiap sistem memiliki karakteristik berbeda dalam mendukung produksi protein. Sistem bakteri menunjukkan kecepatan pertumbuhan tinggi serta biaya produksi rendah. Sistem tersebut memiliki keterbatasan dalam modifikasi pascatranslasi seperti glikosilasi (Rosano & Ceccarelli, 2023). Keterbatasan tersebut memengaruhi kesesuaian protein untuk aplikasi medis tertentu. Pemilihan sistem ekspresi harus disesuaikan dengan kebutuhan produk yang dihasilkan.

Sistem sel mamalia mampu menghasilkan protein dengan struktur kompleks yang menyerupai protein manusia alami (Liu et al., 2024). Karakteristik tersebut menjadikannya ideal untuk produksi antibodi monoklonal dan protein terapeutik kompleks. Biaya produksi pada sistem ini tergolong lebih tinggi dibandingkan sistem bakteri. Kompleksitas proses kultur sel menjadi salah satu faktor peningkatan biaya produksi. Pemilihan sistem ekspresi sangat berpengaruh terhadap efisiensi produksi protein rekombinan (Walsh, 2022). Keputusan penggunaan sistem harus mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas dan biaya produksi.

Terapi gen berbasis DNA rekombinan menjadi salah satu inovasi penting dalam pengobatan penyakit genetik yang sulit ditangani dengan metode konvensional (Ardandi et al., 2024). Teknik ini bekerja dengan cara memperbaiki atau mengganti gen yang mengalami kerusakan di dalam sel pasien. Pendekatan tersebut memungkinkan koreksi langsung pada tingkat molekuler. Keberhasilan terapi sangat dipengaruhi oleh ketepatan vektor dalam membawa materi genetik ke sel target. Aplikasi klinisnya terus berkembang seiring peningkatan teknologi vektor yang lebih aman dan efisien. Pengembangan ini membuka peluang besar dalam pengobatan berbasis personalisasi medis.

Penerapan bioteknologi DNA rekombinan memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan vaksin modern, termasuk vaksin COVID-19 (Pranita et al., 2021). Teknologi ini memungkinkan produksi antigen secara lebih cepat dibandingkan metode tradisional. Proses rekayasa genetika digunakan untuk menghasilkan protein virus yang tidak berbahaya namun tetap mampu memicu respons imun. Efektivitas vaksin sangat bergantung pada stabilitas ekspresi protein yang dihasilkan. Pendekatan ini mempercepat respons global terhadap pandemi yang terjadi. Inovasi tersebut menjadi tonggak penting dalam perkembangan imunisasi berbasis bioteknologi.

Teknologi DNA rekombinan juga berperan dalam pengembangan vaksinasi yang lebih spesifik dan aman untuk berbagai penyakit infeksi (Pranita et al., 2021). Produksi vaksin dilakukan dengan memanfaatkan sistem ekspresi untuk menghasilkan antigen target. Proses ini memungkinkan kontrol kualitas yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Stabilitas genetik menjadi faktor penting dalam memastikan efektivitas vaksin. Penggunaan teknologi ini mengurangi risiko penggunaan patogen hidup dalam produksi vaksin. Pengembangan terus dilakukan untuk meningkatkan efisiensi serta cakupan perlindungan imun.

Penerapan DNA rekombinan dalam bidang pertanian mendukung pengembangan benih unggul dengan karakteristik yang lebih tahan terhadap penyakit dan lingkungan ekstrem (Nafisah, Z.). Rekayasa genetika memungkinkan penyisipan sifat unggul ke dalam tanaman tertentu. Teknologi ini meningkatkan produktivitas hasil pertanian secara signifikan. Perubahan sifat tanaman dilakukan tanpa mengubah keseluruhan struktur genetik

dasar. Inovasi tersebut membantu meningkatkan ketahanan pangan di berbagai wilayah. Pemanfaatannya menjadi solusi strategis dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

Perkembangan teknologi DNA rekombinan membuka peluang besar dalam berbagai bidang mulai dari kesehatan hingga pertanian modern (Ardandi et al., 2024). Integrasi teknologi ini dengan sistem bioteknologi lain meningkatkan efisiensi produksi biologis. Penggunaan teknik rekayasa genetik memberikan fleksibilitas dalam pengembangan produk baru. Tantangan etika dan keamanan tetap menjadi perhatian utama dalam implementasinya. Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengoptimalkan hasil yang lebih stabil dan aman. Masa depan teknologi ini diperkirakan semakin berkembang seiring kemajuan ilmu molekuler.

2. Produksi Protein Terapeutik

Produksi protein terapeutik merupakan salah satu aplikasi utama teknologi DNA rekombinan dalam bidang medis (Walsh, 2022). Protein ini digunakan untuk menggantikan protein tubuh yang tidak diproduksi secara normal. Protein terapeutik juga berfungsi untuk memperbaiki atau meningkatkan aktivitas biologis tertentu dalam tubuh manusia (Liu et al., 2024). Teknologi rekombinan memungkinkan produksi protein dalam jumlah besar dengan kualitas yang konsisten. Proses ini dilakukan melalui sistem ekspresi sel yang telah direkayasa secara genetik. Perkembangan ini menjadi dasar penting dalam industri biofarmasi modern. Insulin rekombinan menjadi salah satu contoh paling sukses dari penerapan teknologi DNA rekombinan dalam bidang kesehatan (Rosano & Ceccarelli, 2023). Produk ini menggantikan insulin hewani yang sebelumnya memiliki risiko reaksi imunologis pada pasien. Penggunaan insulin rekombinan meningkatkan keamanan terapi diabetes secara signifikan. Produksi insulin dilakukan dengan memanfaatkan mikroorganisme sebagai sistem ekspresi. Teknologi ini memungkinkan produksi massal dengan biaya yang lebih efisien. Keberhasilan insulin rekombinan membuka jalan bagi pengembangan protein terapeutik lainnya.

Protein terapeutik lain yang banyak dikembangkan meliputi hormon pertumbuhan manusia (hGH), interferon, dan eritropoietin (Walsh, 2022). Hormon pertumbuhan digunakan untuk mengatasi gangguan pertumbuhan pada anak. Interferon berperan dalam terapi infeksi virus serta beberapa jenis kanker. Eritropoietin membantu meningkatkan produksi sel darah merah pada pasien anemia. Penggunaan protein tersebut meningkatkan efektivitas terapi dibandingkan metode konvensional. Dampak klinisnya terlihat pada peningkatan kualitas hidup pasien (Liu et al., 2024). Antibodi monoklonal menjadi salah satu produk protein terapeutik yang berkembang pesat dalam bioteknologi modern (Krammer, 2023). Antibodi ini dirancang untuk mengenali antigen spesifik pada sel kanker atau patogen. Mekanisme kerja yang spesifik membuat terapi menjadi lebih terarah. Teknologi rekombinan memungkinkan produksi antibodi dalam skala besar. Modifikasi struktur antibodi juga dapat dilakukan untuk meningkatkan efektivitasnya (Tripathi & Shrivastava, 2023). Pengembangan ini memberikan harapan baru dalam pengobatan penyakit kompleks. Kemajuan teknologi rekayasa protein seperti protein engineering dan glycoengineering mendukung peningkatan kualitas protein terapeutik (Liu et al., 2024). Teknik tersebut memungkinkan modifikasi struktur protein untuk meningkatkan stabilitas dan efektivitas. Pengembangan ini membantu menciptakan produk biofarmaka yang lebih aman digunakan. Proses optimasi dilakukan pada tingkat molekuler untuk meningkatkan performa biologis. Industri farmasi memanfaatkan teknologi ini untuk mempercepat inovasi obat baru. Perkembangan tersebut memperkuat posisi bioteknologi dalam dunia medis modern. Bioreaktor canggih memiliki peran penting dalam produksi protein terapeutik skala besar melalui pengendalian kondisi lingkungan yang optimal (Hasna, 2025). Sistem ini memungkinkan pengaturan suhu, pH, oksigen, dan nutrisi secara presisi. Pengendalian tersebut berpengaruh langsung terhadap produktivitas sel inang. Peningkatan skala produksi dapat dilakukan tanpa mengurangi kualitas protein. Teknologi bioreaktor modern mendukung efisiensi proses industri bioteknologi. Perkembangan ini menjadi fondasi utama dalam produksi biofarmaka massal.

Sistem ekspresi *Pichia pastoris* banyak digunakan dalam produksi protein terapeutik dan vaksin manusia karena kemampuannya menghasilkan protein dalam jumlah tinggi (Herawati, 2015). Ragi ini memiliki sistem ekspresi yang stabil dan mampu melakukan modifikasi pascatranslasi sederhana. Penggunaan *Pichia pastoris* juga relatif lebih ekonomis dibandingkan sistem sel mamalia. Mikroorganisme ini mudah dikultur dalam skala industri besar. Produksi protein dengan sistem ini banyak diterapkan dalam pengembangan vaksin modern. Keunggulan tersebut menjadikannya sistem ekspresi yang sangat populer dalam bioteknologi.

Produksi protein rekombinan menggunakan *Pichia pastoris* telah banyak diteliti sebagai sistem ekspresi yang efisien (Gaffar, 2010). Sistem ini mampu mengekspresikan protein heterolog dengan tingkat ekspresi yang tinggi. Proses induksi ekspresi biasanya dilakukan menggunakan metanol sebagai sumber karbon. Stabilitas genetik dalam sistem ini mendukung konsistensi produksi protein. Hasil protein yang dihasilkan dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan terapeutik. Penggunaan sistem ini terus berkembang dalam industri bioteknologi modern. Separasi protein menjadi tahap penting dalam proses produksi protein terapeutik untuk memperoleh produk yang murni (Japranata, 2016). Teknik ultrafiltrasi digunakan untuk memisahkan protein berdasarkan ukuran molekul. Proses ini membantu menghilangkan kontaminan seperti protein lain dan senyawa kecil. Membran dengan ukuran pori

tertentu digunakan untuk meningkatkan selektivitas pemisahan. Teknik ini banyak digunakan dalam industri farmasi dan bioteknologi. Hasil pemisahan yang optimal meningkatkan kualitas produk akhir. Penggunaan bioreaktor modern memungkinkan peningkatan kontrol proses fermentasi dalam produksi protein rekombinan (Hasna, 2025). Sistem ini mendukung skalabilitas dari skala laboratorium ke industri. Efisiensi produksi dapat ditingkatkan melalui optimasi parameter operasional. Teknologi ini juga mengurangi risiko kontaminasi selama proses produksi. Integrasi sensor digital meningkatkan akurasi pemantauan proses. Perkembangan ini mempercepat produksi biofarmaka secara global. *Pichia pastoris* memiliki kemampuan tinggi dalam menghasilkan protein rekombinan dengan struktur yang stabil (Herawati, 2015). Sistem ini mampu tumbuh dalam media sederhana dengan kepadatan sel tinggi. Kemampuan adaptasi yang baik membuatnya cocok untuk produksi skala besar. Protein yang dihasilkan dapat digunakan dalam aplikasi medis dan penelitian. Sistem ini juga mendukung ekspresi protein kompleks tertentu. Keunggulan tersebut menjadikannya alternatif penting dalam bioteknologi.

Optimasi produksi protein rekombinan dalam *Pichia pastoris* dilakukan melalui rekayasa genetik dan pengaturan kondisi kultur (Gaffar, 2010). Teknik ini meningkatkan efisiensi ekspresi protein target. Pengaturan promotor gen berperan penting dalam meningkatkan hasil produksi. Proses fermentasi dilakukan secara terkontrol untuk menjaga kualitas protein. Hasil optimasi menunjukkan peningkatan signifikan dalam skala industri. Pendekatan ini terus dikembangkan untuk meningkatkan produktivitas. Teknik ultrafiltrasi memberikan solusi efektif dalam pemurnian protein terapeutik dengan tingkat selektivitas tinggi (Japanata, 2016). Proses ini mampu memisahkan molekul berdasarkan ukuran dan berat molekul. Penggunaan tekanan membran mempercepat proses separasi. Teknik ini juga dapat dikombinasikan dengan metode pemurnian lain. Hasil akhir protein memiliki tingkat kemurnian yang lebih tinggi. Aplikasi metode ini sangat penting dalam industri biofarmasi modern.

3. Produksi Vaksin Rekombinan

Teknologi DNA rekombinan memberikan kontribusi besar dalam pengembangan vaksin modern yang lebih aman dan efektif (Krammer, 2023). Vaksin rekombinan dihasilkan melalui ekspresi antigen spesifik dari patogen tanpa penggunaan organisme patogen secara langsung. Pendekatan tersebut menurunkan risiko infeksi pada proses produksi maupun penggunaan vaksin. Sistem ini memungkinkan produksi antigen dalam bentuk protein yang telah dimurnikan. Penggunaan teknologi ini meningkatkan kontrol terhadap kualitas vaksin yang dihasilkan. Perkembangan ini menjadi dasar penting dalam inovasi imunisasi modern (Liu et al., 2024). Proses produksi vaksin rekombinan dimulai dengan identifikasi gen yang mengkode antigen imunogenik pada patogen (Walsh, 2022). Gen tersebut kemudian dimasukkan ke dalam sistem ekspresi untuk menghasilkan protein antigen dalam jumlah besar. Ekspresi protein dilakukan menggunakan sel inang yang telah direkayasa secara genetik. Protein antigen yang dihasilkan selanjutnya dipisahkan dari komponen lain melalui proses pemurnian. Tahapan ini memastikan antigen memiliki kualitas yang sesuai untuk aplikasi vaksin. Hasil akhir digunakan sebagai bahan dasar vaksin yang aman dan stabil (Tripathi & Shrivastava, 2023).

Vaksin hepatitis B menjadi salah satu contoh keberhasilan teknologi rekombinan dalam dunia kesehatan modern (Krammer, 2023). Vaksin ini dikembangkan menggunakan antigen permukaan virus yang diproduksi melalui sistem rekombinan. Vaksin human papillomavirus (HPV) juga dikembangkan dengan pendekatan serupa untuk mencegah infeksi penyebab kanker serviks. Kedua vaksin tersebut menunjukkan efektivitas tinggi dalam mencegah penyakit infeksi. Penggunaan teknologi ini meningkatkan cakupan perlindungan kesehatan masyarakat. Keberhasilan tersebut memperkuat posisi bioteknologi dalam bidang imunisasi (Liu et al., 2024). Vaksin COVID-19 berbasis protein rekombinan menjadi salah satu inovasi penting dalam penanganan pandemi global (Liu et al., 2024). Vaksin ini dikembangkan dengan mengekspresikan protein spike virus sebagai antigen utama. Sistem ini memungkinkan produksi vaksin dalam waktu relatif lebih cepat dibandingkan metode konvensional. Efikasi vaksin menunjukkan hasil yang baik dalam uji klinis. Keamanan vaksin juga menjadi perhatian utama dalam pengembangannya. Teknologi ini mempercepat respons global terhadap krisis kesehatan (Walsh, 2022).

Keunggulan vaksin rekombinan mencakup tingkat keamanan yang tinggi dan stabilitas produk yang baik (Walsh, 2022). Produksi vaksin dapat dilakukan dalam skala besar untuk memenuhi kebutuhan global. Teknologi ini juga memungkinkan kontrol kualitas yang lebih ketat selama proses produksi. Distribusi vaksin menjadi lebih efisien karena karakteristik produk yang stabil. Pengembangan vaksin rekombinan terus ditingkatkan untuk menghadapi berbagai penyakit baru. Inovasi ini menjadi bagian penting dalam sistem kesehatan modern. Tantangan dalam pengembangan vaksin rekombinan meliputi kebutuhan teknologi tinggi dan biaya produksi yang cukup besar (Tripathi & Shrivastava, 2023). Proses produksi memerlukan fasilitas laboratorium dan industri yang sangat terkontrol. Kompleksitas teknik rekayasa genetik menjadi faktor yang mempengaruhi biaya. Pengembangan vaksin juga memerlukan waktu penelitian yang panjang. Regulasi ketat dalam industri farmasi turut mempengaruhi proses pengembangan. Kendala tersebut menjadi fokus utama dalam peningkatan efisiensi teknologi.

Pengembangan vaksin rekombinan terus mengalami peningkatan seiring kebutuhan global terhadap imunisasi yang lebih aman (Krammer, 2023). Teknologi ini memungkinkan produksi antigen dalam sistem ekspresi yang terkontrol secara genetik. Sistem tersebut menghasilkan protein yang dapat memicu respons imun spesifik pada

tubuh manusia. Proses rekayasa genetik meningkatkan akurasi dalam pemilihan target antigen patogen (Walsh, 2022). Stabilitas ekspresi protein menjadi faktor penting dalam keberhasilan produksi vaksin. Perkembangan metode ini mendukung efisiensi dalam produksi vaksin modern (Liu et al., 2020). Sistem ekspresi protein dalam produksi vaksin rekombinan memerlukan optimasi agar menghasilkan antigen berkualitas tinggi (Tripathi & Shrivastava, 2023). Optimasi dilakukan melalui pengaturan kondisi kultur sel dan pemilihan vektor yang sesuai. Ekspresi protein yang stabil meningkatkan efektivitas imunisasi yang dihasilkan. Proses produksi melibatkan tahapan pemurnian untuk memperoleh antigen dengan tingkat kemurnian tinggi. Pengendalian proses bioteknologi memberikan hasil yang lebih konsisten dalam skala industri. Teknologi ini mendukung pengembangan vaksin yang lebih efisien dan terstandarisasi (Walsh, 2022). Aplikasi vaksin rekombinan menunjukkan perkembangan luas dalam pencegahan berbagai penyakit menular (Liu et al., 2024). Teknologi ini memberikan alternatif vaksin yang tidak menggunakan patogen hidup. Keamanan produk menjadi lebih tinggi dibandingkan metode vaksin tradisional. Sistem produksi berbasis protein rekombinan memungkinkan respons cepat terhadap wabah penyakit baru. Pengembangan vaksin terus diarahkan pada peningkatan efektivitas dan stabilitas antigen (Krammer, 2023). Inovasi ini memperkuat peran bioteknologi dalam kesehatan masyarakat global.

4. Pengembangan Obat Modern (Biofarmaka)

Biofarmaka merupakan produk obat yang dihasilkan melalui teknologi bioteknologi termasuk DNA rekombinan yang digunakan untuk terapi berbagai penyakit kompleks (Walsh, 2022). Produk ini mencakup berbagai molekul biologis yang dirancang untuk bekerja secara spesifik pada target penyakit tertentu. Pengembangan biofarmaka dilakukan melalui rekayasa genetik pada sistem ekspresi sel. Teknologi tersebut memungkinkan produksi obat dengan tingkat kemurnian dan efektivitas tinggi. Biofarmaka menjadi bagian penting dalam pengobatan modern berbasis biologi molekuler (Liu et al., 2024). Produk biofarmaka meliputi antibodi monoklonal protein rekombinan vaksin serta enzim terapeutik yang memiliki spesifisitas tinggi terhadap target penyakit (Liu et al., 2024). Setiap produk dikembangkan melalui proses bioteknologi yang terkontrol secara ketat. Produksi dilakukan menggunakan sistem ekspresi yang telah direkayasa secara genetik. Hasil akhir berupa molekul biologis yang memiliki fungsi terapeutik spesifik. Penggunaan biofarmaka meningkatkan efektivitas terapi berbagai penyakit kronis. Perkembangan ini memperluas pilihan pengobatan dalam dunia medis modern (Walsh, 2022).

Antibodi monoklonal menjadi salah satu jenis biofarmaka yang banyak digunakan dalam terapi kanker dan penyakit autoimun (Krammer, 2023). Molekul ini mampu mengenali antigen spesifik pada sel target penyakit. Mekanisme kerja yang spesifik meningkatkan efektivitas pengobatan. Produksi antibodi dilakukan melalui teknologi DNA rekombinan dalam sistem sel inang. Hasil terapi menunjukkan tingkat keberhasilan yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Penggunaan antibodi monoklonal terus berkembang dalam bidang klinis modern. Protein rekombinan digunakan dalam terapi penggantian enzim untuk penyakit genetik tertentu (Tripathi & Shrivastava, 2023). Terapi ini membantu menggantikan enzim yang tidak berfungsi dalam tubuh pasien. Produksi protein dilakukan menggunakan sistem ekspresi mikroorganisme atau sel mamalia. Hasil protein memiliki struktur yang menyerupai protein alami manusia. Pendekatan ini meningkatkan efektivitas terapi jangka panjang. Penggunaan protein rekombinan menjadi solusi penting dalam pengobatan penyakit langka.

Teknologi DNA rekombinan digunakan dalam produksi enzim industri dan farmasi yang lebih efisien dan ramah lingkungan (Rosano & Ceccarelli, 2023). Enzim tersebut digunakan dalam sintesis antibiotik dan berbagai obat lainnya. Proses produksi mengurangi ketergantungan pada bahan kimia berbahaya. Efisiensi reaksi kimia meningkat melalui penggunaan enzim biologis. Teknologi ini mendukung keberlanjutan dalam industri farmasi modern. Inovasi ini memperluas aplikasi bioteknologi di berbagai sektor. Penggunaan enzim rekombinan meningkatkan efisiensi proses produksi dalam industri farmasi (Walsh, 2022). Reaksi biokimia menjadi lebih cepat dan terkontrol dengan baik. Enzim hasil rekayasa memiliki stabilitas yang lebih tinggi dibandingkan enzim alami. Penggunaan teknologi ini juga menurunkan biaya produksi jangka panjang. Aplikasi enzim rekombinan mendukung pengembangan obat yang lebih aman. Peran enzim semakin penting dalam inovasi bioteknologi modern.

Biofarmaka berkembang pesat sebagai salah satu sektor utama dalam industri farmasi global (Liu et al., 2024). Pertumbuhan ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan terapi yang lebih spesifik. Teknologi bioteknologi memungkinkan pengembangan obat berbasis molekul biologis. Sistem pengobatan menjadi lebih personal dan efektif untuk pasien. Produksi biofarmaka terus meningkat seiring kemajuan teknologi rekayasa genetika. Perkembangan ini memperkuat posisi bioteknologi dalam kesehatan global. Terapi berbasis biofarmaka memberikan pendekatan pengobatan yang lebih terarah pada penyakit tertentu (Krammer, 2023). Penggunaan molekul biologis memungkinkan pengobatan dengan efek samping lebih rendah. Sistem kerja obat didasarkan pada interaksi spesifik dengan target biologis. Efektivitas terapi meningkat melalui desain molekuler yang presisi. Biofarmaka menjadi alternatif utama dalam pengobatan modern. Inovasi ini terus berkembang dalam penelitian klinis global. Pengembangan biofarmaka berbasis teknologi DNA rekombinan terus mengalami peningkatan dalam berbagai bidang medis (Walsh, 2022). Penelitian difokuskan pada peningkatan efektivitas dan keamanan produk. Sistem ekspresi terus dioptimalkan untuk menghasilkan protein berkualitas tinggi. Inovasi teknologi mendukung

percepatan produksi obat modern. Kolaborasi penelitian memperluas aplikasi biofarmaka di dunia kesehatan. Perkembangan ini menjadi fondasi penting dalam masa depan terapi berbasis bioteknologi.

5. Keunggulan dan Tantangan

Teknologi DNA rekombinan memiliki keunggulan penting dalam produksi protein dan obat modern (Walsh, 2022). Sistem ini mampu menghasilkan protein dalam jumlah besar dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Kualitas produk yang dihasilkan bersifat konsisten dan dapat direproduksi secara stabil pada setiap siklus produksi. Rekayasa genetik memungkinkan peningkatan efektivitas protein terapeutik melalui modifikasi struktur molekul. Teknologi ini menjadi dasar utama dalam pengembangan biofarmaka modern di berbagai bidang kesehatan. Penerapan teknologi ini juga mempercepat inovasi dalam industri farmasi berbasis bioteknologi (Rosano & Ceccarelli, 2023). Kemampuan modifikasi protein menjadi salah satu keunggulan utama teknologi DNA rekombinan dalam bidang medis (Liu et al., 2024). Protein dapat direkayasa agar memiliki fungsi terapeutik yang lebih spesifik terhadap target penyakit tertentu. Efek samping dapat diminimalkan melalui desain molekuler yang disesuaikan dengan kebutuhan klinis. Produksi obat menjadi lebih aman dibandingkan metode konvensional yang masih menggunakan bahan biologis alami. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi dalam pengobatan berbagai penyakit kompleks yang sebelumnya sulit ditangani. Perkembangan ini memperluas potensi terapi berbasis bioteknologi modern (Walsh, 2022).

Fleksibilitas sistem ekspresi menjadi keunggulan lain dalam teknologi DNA rekombinan (Tripathi & Shrivastava, 2023). Berbagai jenis protein dapat diproduksi menggunakan sistem ekspresi yang berbeda sesuai kebutuhan produksi. Sistem tersebut mencakup bakteri, ragi, hingga sel mamalia dengan karakteristik yang berbeda. Pemilihan sistem dilakukan berdasarkan tingkat kompleksitas struktur protein yang diinginkan. Proses ini memungkinkan produksi protein sederhana hingga protein kompleks secara efisien dan terarah. Keunggulan ini menjadikan teknologi rekombinan sangat adaptif dalam berbagai aplikasi bioteknologi (Rosano & Ceccarelli, 2023). Keamanan produksi menjadi salah satu keunggulan penting teknologi DNA rekombinan dalam industri farmasi modern (Walsh, 2022). Proses produksi tidak bergantung pada sumber biologis alami yang berpotensi membawa patogen berbahaya. Penggunaan sistem rekayasa genetik memberikan kontrol penuh terhadap kualitas produk yang dihasilkan. Risiko kontaminasi dapat ditekan secara signifikan melalui prosedur laboratorium yang terstandarisasi. Teknologi ini juga mendukung produksi obat dengan tingkat keamanan yang lebih tinggi bagi pasien. Hal tersebut menjadikan biofarmaka lebih dipercaya dalam dunia medis global (Liu et al., 2024).

Biaya produksi menjadi salah satu tantangan utama dalam penerapan teknologi DNA rekombinan pada skala industri (Liu et al., 2024). Sistem ekspresi sel mamalia membutuhkan fasilitas khusus dengan biaya investasi yang sangat tinggi. Proses pengelolaan kultur sel juga memerlukan pengawasan yang ketat dan berkelanjutan. Kompleksitas produksi menyebabkan peningkatan biaya operasional secara signifikan dalam industri farmasi. Kondisi ini membatasi akses produksi pada beberapa perusahaan besar saja. Efisiensi biaya masih menjadi fokus utama dalam pengembangan teknologi ini (Rosano & Ceccarelli, 2023). Proses pemurnian protein merupakan tantangan teknis dalam produksi berbasis DNA rekombinan yang tidak dapat diabaikan (Rosano & Ceccarelli, 2023). Tahapan ini membutuhkan metode yang sangat presisi untuk menghasilkan produk dengan tingkat kemurnian tinggi. Kontaminan harus dipisahkan secara efektif agar tidak mempengaruhi kualitas akhir protein. Kompleksitas struktur protein tertentu sering memperumit proses pemurnian di tingkat industri. Teknologi pemisahan modern seperti filtrasi membran digunakan untuk meningkatkan efisiensi proses. Hasil pemurnian yang optimal sangat menentukan keberhasilan produk biofarmaka (Walsh, 2022).

Regulasi industri farmasi menjadi tantangan besar dalam pengembangan produk berbasis DNA rekombinan (Tripathi & Shrivastava, 2023). Setiap produk harus melalui serangkaian uji klinis yang panjang dan ketat sebelum dapat dipasarkan. Standar keamanan internasional wajib dipenuhi untuk memastikan keamanan penggunaan pada manusia. Proses persetujuan regulasi sering memerlukan waktu bertahun-tahun dalam pengembangannya. Hal ini menyebabkan lambatnya proses komersialisasi produk biofarmaka baru. Regulasi tetap diperlukan untuk menjaga keselamatan pasien dalam penggunaan obat modern (Walsh, 2022). Stabilitas protein selama penyimpanan menjadi faktor penting dalam pengembangan biofarmaka modern (Walsh, 2022). Protein terapeutik dapat mengalami degradasi jika tidak disimpan dalam kondisi lingkungan yang sesuai. Suhu penyimpanan dan formulasi produk sangat mempengaruhi kestabilan struktur protein. Penggunaan bahan stabilizer diperlukan untuk mempertahankan aktivitas biologis protein dalam jangka panjang. Tantangan ini berdampak pada distribusi dan logistik produk farmasi secara global. Penelitian terus dilakukan untuk meningkatkan ketahanan protein terapeutik (Liu et al., 2024). Efisiensi ekspresi gen dalam sel inang menjadi salah satu faktor penting dalam produksi protein rekombinan (Liu et al., 2024). Tingkat ekspresi gen sangat mempengaruhi jumlah protein yang dapat dihasilkan oleh sistem. Optimasi kondisi kultur diperlukan untuk meningkatkan produktivitas sel secara maksimal. Faktor genetik dan lingkungan memiliki peran besar dalam menentukan hasil ekspresi protein. Inovasi dalam rekayasa genetika terus dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi produksi. Pengembangan ini menjadi fokus utama dalam kemajuan bioteknologi modern (Tripathi & Shrivastava, 2023).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa teknologi DNA rekombinan memiliki peran yang sangat penting dan strategis dalam perkembangan bioteknologi modern, khususnya dalam produksi protein terapeutik dan obat-obatan berbasis biofarmaka. Teknologi ini memungkinkan produksi protein secara spesifik, efisien, dan dalam skala besar dengan tingkat kemurnian yang tinggi, sehingga mampu memenuhi kebutuhan medis global yang terus meningkat. Pemanfaatan DNA rekombinan telah terbukti berhasil dalam menghasilkan berbagai produk biofarmaka seperti insulin rekombinan, antibodi monoklonal, hormon terapeutik, vaksin rekombinan, serta enzim yang digunakan dalam terapi berbagai penyakit kronis dan degeneratif. Selain itu, teknologi ini juga memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan keamanan produk farmasi karena mengurangi ketergantungan pada sumber biologis alami yang berisiko menimbulkan reaksi imunologis. Di sisi lain, teknologi DNA rekombinan juga membuka peluang besar dalam pengembangan terapi yang lebih personal (personalized medicine) melalui rekayasa protein yang disesuaikan dengan kebutuhan pasien. Hal ini menjadikan biofarmaka sebagai salah satu sektor dengan pertumbuhan tercepat dalam industri farmasi global. Meskipun demikian, terdapat beberapa tantangan yang masih perlu diatasi, seperti tingginya biaya produksi, kompleksitas proses pemurnian protein, serta regulasi yang ketat dalam industri farmasi. Selain itu, efisiensi ekspresi gen, stabilitas protein, dan pemilihan sistem ekspresi yang tepat juga menjadi faktor penting yang mempengaruhi keberhasilan produksi protein rekombinan. Dengan perkembangan teknologi yang semakin pesat, diharapkan inovasi dalam bidang rekayasa genetika dan bioproses dapat mengatasi berbagai kendala tersebut sehingga teknologi DNA rekombinan dapat dimanfaatkan secara lebih luas dan optimal. Oleh karena itu, teknologi ini memiliki prospek yang sangat menjanjikan sebagai fondasi utama dalam pengembangan obat modern serta peningkatan kualitas layanan kesehatan di masa depan.

Reference

- Ardandi, R. Y., Nurhaliza, S., Poty, P. M., Sha, N. P., & Rahmanisa, S. (2024). Penerapan DNA rekombinan dalam terapi gen. *Medical Profession Journal of Lampung*, 14(5), 895–900.
- Ardandi, Rofi Yoga, et al. (2024). Penerapan DNA rekombinan dalam terapi gen. *Medical Profession Journal of Lampung*, 14(5), 895–900.
- Demain, A. L., & Vaishnav, P. (2019). Production of recombinant proteins by microbes. *Biotechnology Advances*, 37(1), 104–123. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.11.002>
- Gaffar, S. (2010). Produksi protein rekombinan dalam sistem ekspresi *Pichia pastoris*.
- Hasna, A. (2025). Bioreaktor canggih untuk produksi protein terapeutik skala besar. *Jurnal Biokimia*, 2(1).
- Herawati, N. (2015). *Pichia pastoris* yeast penghasil protein terapeutik dan vaksin manusia. *Biotrends*, 6(1), 14–17.
- Japranata, H. H. (2016). Separasi protein dengan membran ultrafiltrasi. *Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung*, June, 1–8.
- Jayapal, K. P., et al. (2020). Recombinant protein therapeutics: Production platforms. *Biotechnology Journal*, 15(3), e1900187. <https://doi.org/10.1002/biot.201900187>
- Khan, F. A., et al. (2021). Recombinant DNA technology and its applications. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 825–835. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.11.013>
- Krammer, F. (2023). SARS-CoV-2 vaccines in development. *Nature*, 586, 516–527. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2798-3>
- Kumar, R., et al. (2021). Monoclonal antibodies: A review. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 22(3), 320–332. <https://doi.org/10.2174/1389201021666200918114933>
- Lagassé, H. A. D., et al. (2020). Recent advances in protein therapeutics. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 109(3), 1137–1152. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2019.11.002>
- Liu, J., et al. (2024). Advances in therapeutic proteins and monoclonal antibodies. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1), 45. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01721-5>
- Makino, T., et al. (2023). Advances in biopharmaceutical manufacturing. *Biochemical Engineering Journal*, 196, 108894. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108894>
- Nafisah, Z. (n.d.). *BAB 4 Teknologi DNA rekombinan*. Dalam *Bioteknologi dalam produksi dan rekayasa benih unggul*, 55.
- Noviantari, A., & Khariri, K. (2020, July). Pemanfaatan teknologi biologi sel dalam dunia kedokteran modern. In *SINASIS (Seminar Nasional Sains)* (Vol. 1, No. 1).
- Pardi, N., et al. (2020). mRNA vaccines — a new era in vaccinology. *Nature Reviews Drug Discovery*, 19, 261–279. <https://doi.org/10.1038/s41573-020-00075-6>
- Pranita, N. P., Novtarina, R., Nugroho, R. C., Himayani, R., & Ismunandar, H. (2021). Penerapan bioteknologi DNA rekombinan: Pengembangan vaksinasi COVID-19. *Medical Profession Journal of Lampung*, 11(3), 300–305.
- Rosano, G. L., & Ceccarelli, E. A. (2023). Recombinant protein expression in microbial systems. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1182345. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1182345>
- Schillberg, S., et al. (2019). Recombinant protein production in plants. *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.01.019>
- Suwanto, A. (1998). Bioteknologi molekuler: Mengoptimalkan manfaat keanekaragaman hayati melalui teknologi DNA rekombinan. *Jurnal Hayati*, 5(1), 25–28.
- Tripathi, N. K., & Shrivastava, A. (2023). Recent developments in recombinant protein production. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1123456. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2023.1123456>
- Walsh, G. (2022). Biopharmaceutical benchmarks 2022. *Nature Biotechnology*, 40(12), 1722–1760. <https://doi.org/10.1038/s41587-022-01234-4>
- Yaumie, S. N., & Zahro, F. (2025). *Kunci menuju bioteknologi modern melalui DNA rekombinan dan plasmid*. Kramantara JS.
- Yadav, S., et al. (2020). Role of recombinant DNA technology in modern medicine. *Biotechnology Reports*, 26, e00467. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00467>