

KONSEP EPIGENETIK DALAM REGULASI EKSPRESI GEN DAN IMPLIKASINYA BAGI PEMBELAJARAN BIOLOGI: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS

Oleh:

Fiqi Amalia¹

Halimatus Sya'diah²

Salsabila Nurshabrina Hirzi³

Putri Dwi Nurjanah⁴

Universitas Islam Negeri Raden Intan Lampung

Alamat: JL. Letnan Kolonel H Jl. Endro Suratmin, Sukarame, Kec. Sukarame, Kota Bandar Lampung, Lampung (35131).

Korespondensi Penulis: fqiamalia2413@gmail.com,
akunbelajarhalimatus01@gmail.com, salsabilahirzi@gmail.com,
putrilampung669@gmail.com.

Abstract. This study aims to examine the role of epigenetic mechanisms specifically DNA methylation, histone modification, and non-coding RNA regulation in orchestrating gene expression, as well as to identify their pedagogical implications for strengthening biology education. Employing a systematic literature review guided by the PRISMA 2020 framework, seven relevant peer-reviewed articles were selected and analyzed to map essential theoretical constructs, current methodological advances, and emerging opportunities for integrating epigenetics into instructional practices. The analysis demonstrates that epigenetics offers a multidimensional perspective on the dynamic interplay between genes and the environment, highlighting how external factors can modulate gene activity without altering DNA sequences. This conceptual richness positions epigenetics as a powerful foundation for contextual, inquiry-based, and concept-driven learning that aligns with 21st-century scientific literacy skills. Furthermore, the review underscores the importance of embedding epigenetic concepts

Received October 29, 2025; Revised November 11, 2025; November 29, 2025

*Corresponding author: fqiamalia2413@gmail.com

KONSEP EPIGENETIK DALAM REGULASI EKSPRESI GEN DAN IMPLIKASINYA BAGI PEMBELAJARAN BIOLOGI: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS

within biology curricula to enhance students' critical thinking, molecular reasoning, and their understanding of modern biological phenomena. Overall, this study affirms the relevance of epigenetics as an essential component for advancing contemporary biology education and fostering deeper comprehension of molecular mechanisms that shape living.

Keywords: *Biology Education, Epigenetics, Gene Expression, Learning Integration, Regulation.*

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji peran mekanisme epigenetik meliputi metilasi DNA, modifikasi histon, dan regulasi RNA non coding dalam mengatur ekspresi gen serta mengidentifikasi implikasinya bagi penguatan pembelajaran biologi. Dengan menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis yang merujuk pada pedoman PRISMA 2020, tujuh artikel ilmiah yang relevan dianalisis untuk memetakan konsep-konsep kunci, perkembangan metodologis terbaru, serta peluang integrasi epigenetika dalam praktik pembelajaran. Hasil analisis menunjukkan bahwa epigenetika menawarkan perspektif multidimensional mengenai dinamika interaksi gen-lingkungan, terutama bagaimana faktor eksternal mampu memodulasi aktivitas gen tanpa mengubah urutan DNA. Kekayaan konsep ini menjadikan epigenetika sebagai landasan yang kuat bagi pembelajaran kontekstual, berbasis inkuiri, dan berorientasi pada pemahaman konsep yang sejalan dengan tuntutan literasi sains abad ke-21. Tinjauan ini juga menegaskan pentingnya memasukkan konsep epigenetika ke dalam kurikulum biologi untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis, penalaran molekuler, serta pemahaman siswa terhadap fenomena biologi modern. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan relevansi epigenetika sebagai komponen esensial dalam memajukan pembelajaran biologi kontemporer dan memperdalam pemahaman mengenai mekanisme molekuler yang membentuk sistem kehidupan.

Kata Kunci: Biologi, Epigenetik, Ekspresi Gen, Pembelajaran, Regulasi.

LATAR BELAKANG

Perkembangan ilmu biologi modern terus menunjukkan bahwa ekspresi gen tidak hanya ditentukan oleh urutan DNA semata, melainkan juga oleh mekanisme regulasi molekuler yang lebih luas dikenal sebagai epigenetik. Istilah "epigenetik" merujuk pada

perubahan yang diwariskan secara mitotik atau meiotik dalam fungsi gen tanpa melibatkan modifikasi urutan nukleotida, tetapi tetap mampu mengubah ekspresi gen melalui modifikasi kimia atau perubahan struktur kromatin (Hamilton, 2011). Melalui mekanisme tersebut, sel-sel dengan genom yang sama dapat menunjukkan profil ekspresi gen yang berbeda, sehingga memungkinkan terjadinya diferensiasi sel, fungsi jaringan yang spesifik, dan respons organisme terhadap perubahan lingkungan. Pemahaman ini menegaskan bahwa regulasi ekspresi gen merupakan proses dinamis yang bergantung pada interaksi antara faktor internal dan eksternal sel.

Dalam konteks tersebut, mekanisme epigenetik berperan penting dalam mengendalikan “kapan”, “di mana”, dan “seberapa besar” suatu gen diekspresikan untuk mempertahankan homeostasis, mendukung adaptasi lingkungan, dan memastikan perkembangan organisme berlangsung optimal. Penelitian yang dilakukan oleh (Gibney & Nolan, 2010) menunjukkan bahwa proses epigenetik seperti metilasi DNA, modifikasi histon, serta regulasi berbasis RNA berpengaruh besar terhadap aktivitas transkripsi dan tahap-tahap lanjutan dalam jalur ekspresi gen. Temuan ini sejalan dengan penelitian di Indonesia yang menyoroti bahwa faktor lingkungan, pola hidup, dan kondisi fisiologis turut berkontribusi pada perubahan epigenetik, misalnya dalam kajian penuaan yang menunjukkan adanya hubungan antara paparan lingkungan dan perubahan ekspresi gen (Dwi Lunarta Docterina Sutanti Siahaan, 2025).

Sejalan dengan meningkatnya perhatian terhadap mekanisme epigenetik, literatur nasional yang membahas regulasi ekspresi gen juga mulai berkembang. Salah satunya adalah penelitian oleh (Hidayah, 2024) yang mengulas regulasi transkripsi dan pasca-transkripsi serta menempatkan epigenetik sebagai komponen penting dalam pengendalian ekspresi gen. Kendati demikian, upaya untuk memasukkan konsep epigenetik secara sistematis ke dalam pembelajaran biologi masih relatif terbatas, baik dalam bentuk penyusunan modul pembelajaran, integrasi dalam buku teks, maupun penelitian tindakan kelas di tingkat pendidikan menengah dan perguruan tinggi. Kondisi ini menunjukkan perlunya peninjauan lebih mendalam mengenai bagaimana epigenetik dapat diadaptasi sebagai materi pembelajaran yang relevan dan kontekstual.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mencapai beberapa tujuan. Pertama, menjelaskan konsep epigenetik dalam regulasi ekspresi gen secara komprehensif. Kedua, mengidentifikasi bagaimana konsep epigenetik telah diadopsi

KONSEP EPIGENETIK DALAM REGULASI EKSPRESI GEN DAN IMPLIKASINYA BAGI PEMBELAJARAN BIOLOGI: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS

dalam kajian pendidikan biologi. Ketiga, mengeksplorasi implikasi integrasi konsep epigenetik dalam pembelajaran biologi pada konteks pendidikan Indonesia. Dengan tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memperkuat landasan teoritis bagi pengembangan materi ajar yang sesuai dengan kemajuan ilmu biologi modern dan mampu meningkatkan literasi genetik-epigenetik peserta didik.

Untuk memahami kedudukan epigenetik dalam pembelajaran, penting memaparkan mekanisme utama yang melandasinya, yaitu metilasi DNA, modifikasi histon, dan regulasi RNA non-coding. Ketiga mekanisme tersebut memengaruhi struktur kromatin dan tingkat keteraksesan gen, sehingga berdampak langsung pada laju dan pola ekspresi gen (Hamilton, 2011). Pemahaman mekanisme ini dapat dikaitkan ke dalam konteks pembelajaran melalui contoh konkret seperti pengaruh nutrisi prenatal, paparan stres lingkungan, atau gaya hidup terhadap ekspresi gen. Penerapan contoh tersebut membantu siswa memahami bahwa genetika bukanlah sistem yang deterministik, melainkan sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan pengalaman. Perspektif ini memperkaya pemahaman konsep “nature-nurture” yang selama ini dikenal dalam genetika, karena mekanisme epigenetik menunjukkan bahwa interaksi lingkungan dapat memengaruhi ekspresi gen dan bahkan dapat diwariskan (Ewen, 2022).

Dalam ranah pendidikan, integrasi konsep epigenetik menawarkan peluang untuk menghubungkan berbagai konsep biologi yang seringkali diajarkan secara terpisah, seperti struktur dan fungsi gen, regulasi ekspresi gen, biologi perkembangan, kesehatan, hingga evolusi. Artikel oleh Kang (2019) menegaskan bahwa epigenetik sebagai bidang ilmu yang berkembang pesat perlu diperkenalkan kepada siswa agar mereka memahami dinamika regulasi ekspresi gen secara lebih aktual dan kontekstual (Kang et al., 2019). Namun, tantangan tetap muncul dalam hal penyederhanaan konsep, penyesuaian dengan tingkat kognitif peserta didik, serta penyelarasan dengan kurikulum nasional yang masih berfokus pada konsep genetika klasik.

Dengan mempertimbangkan perkembangan ilmu dan kebutuhan pendidikan modern, integrasi konsep epigenetik dalam pembelajaran biologi memiliki potensi besar untuk meningkatkan literasi ilmiah, memperkuat keterampilan berpikir kritis, serta memperluas pemahaman siswa tentang hubungan gen-lingkungan. Oleh karena itu, tinjauan literatur ini penting untuk membuka ruang dialog mengenai inovasi kurikulum, pengembangan bahan ajar, dan pemilihan metode pembelajaran yang lebih relevan

dengan tuntutan abad ke-21, sekaligus memastikan bahwa materi biologi yang diajarkan tetap sejalan dengan perkembangan ilmu mutakhir.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai penelitian terkait konsep epigenetik dalam regulasi ekspresi gen serta implikasinya bagi pembelajaran biologi. Prosedur tinjauan dilakukan dengan mengacu pada pedoman PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) guna memastikan transparansi dan ketertelusuran proses seleksi artikel (Page et al., 2021). Pencarian artikel dilakukan pada beberapa basis data bereputasi, yaitu PubMed, ScienceDirect, Google Scholar, dan jurnal nasional melalui pencarian kata kunci seperti “*epigenetic regulation*”, “*gene expression*”, “*epigenetics and learning*”, “*biologi molekuler*”, “*pembelajaran biologi*”. Pemilihan artikel mengikuti kriteria inklusi berupa, Artikel dipublikasikan dalam rentang 2010-2024, yang membahas terkait mekanisme epigenetik (metilasi DNA, modifikasi histon, RNA non-koding) dalam konteks regulasi ekspresi gen, mengkaji implikasi epigenetik terhadap pendidikan biologi atau proses pembelajaran sains. Sementara itu, artikel ditolak apabila, tidak tersedia dalam teks lengkap, berada di luar fokus topik, atau berupa editorial, abstrak seminar, serta paper non-ilmiah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis terhadap tujuh artikel hasil penyaringan menunjukkan bahwa epigenetik memainkan peran sentral dalam regulasi ekspresi gen, tidak hanya pada tingkat molekuler tetapi juga dalam konteks pendidikan biologi modern. Pada penelitian yang dilakukan oleh (Venkatesh & Makky, 2020) menegaskan pentingnya pendekatan pedagogis interaktif dalam mengajarkan mekanisme epigenetik, terutama karena konsep seperti metilasi DNA, modifikasi histon, dan pengaruh lingkungan terhadap gen merupakan materi yang kompleks bagi peserta didik abad ke-21. Temuan ini sejalan dengan (Kang et al., 2019) yang menunjukkan pertumbuhan eksponensial publikasi epigenetik global dan memprediksi kontribusi bidang ini mencapai seperlima dari keseluruhan penelitian genetika dalam satu dekade mendatang. Keduanya menekankan bahwa integrasi epigenetik ke kurikulum biologi sarjana merupakan kebutuhan

KONSEP EPIGENETIK DALAM REGULASI EKSPRESI GEN DAN IMPLIKASINYA BAGI PEMBELAJARAN BIOLOGI: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS

fundamental untuk mempersiapkan mahasiswa menghadapi perkembangan biologi molekuler modern.

Analisis lebih lanjut memperlihatkan bahwa pemahaman konsep epigenetik tidak hanya penting secara akademik tetapi juga secara klinis dan biomedis. (Meza-mencha et al., 2024) mengusulkan redefinisi konsep epigenetik sebagai sistem regulasi biomolekuler yang kompleks, menambahkan bahwa interaksi antara struktur kuartener biomolekul dan faktor lingkungan berperan penting dalam pembentukan pola ekspresi gen sepanjang hidup. Temuan ini diperkuat oleh (Li, 2022) yang menunjukkan bagaimana metode epigenetik modern terutama analisis metilasi DNA, modifikasi histon, dan pemetaan RNA non-koding berbasis bioinformatika memberikan pemahaman lebih presisi terhadap mekanisme regulasi gen pada kondisi fisiologis dan patologis. Kedua studi ini memberikan dasar bahwa epigenetik telah bertransformasi dari konsep sederhana tentang “penanda kimia pada DNA” menjadi kerangka regulasi multi-dimensi yang dapat menjelaskan dinamika perkembangan, penyakit, dan respons lingkungan.

Selanjutnya dari perspektif pendidikan, (Ewen, 2022) menyebutkan bahwa pemahaman epigenetik menggeser paradigma determinisme genetik, menyoroti bagaimana faktor lingkungan dapat mengatur gen tanpa mengubah sekuen DNA. Hal ini memiliki implikasi besar bagi guru biologi, terutama dalam menjelaskan hubungan antara genetika, perilaku, lingkungan, dan kesehatan. Sementara itu, penelitian (Binder, 2024) memberikan bukti empiris bahwa status metilasi DNA awal seseorang mempengaruhi bagaimana genom merespons paparan lingkungan seperti infeksi virus. Studi tersebut juga menyoroti bahwa tanda metilasi akibat stres masa kanak-kanak lebih akurat dipandang sebagai indikator paparan dibandingkan sebagai penyebab perubahan ekspresi gen jangka panjang. Temuan ini menunjukkan bahwa epigenetik tidak hanya bersifat dinamis, tetapi juga selektif dalam memediasi respons biologis terhadap lingkungan.

Penelitian (Resendiz et al., 2021) semakin memperkuat pemahaman mekanistik epigenetik dengan menunjukkan regulasi ekspresi gen yang berbeda pada fase proliferasi dan sekretori endometrium. Mekanisme seperti metilasi DNA, modifikasi histon, dan peran RNA non-koding terbukti mengontrol pertumbuhan sel, respon hormonal, dan kesiapan implantasi embrio secara siklik. Studi ini memberikan contoh konkret bagaimana regulasi epigenetik bekerja secara temporal, kontekstual, dan dipengaruhi oleh

hormon ovarium, sehingga menegaskan bahwa epigenetik merupakan proses dinamis yang spesifik tipe sel.

Secara keseluruhan, ketujuh artikel menunjukkan pola sintesis bahwa epigenetik merupakan mekanisme regulasi gen yang multidimensional, dinamis, dan sangat dipengaruhi lingkungan, sekaligus memiliki relevansi besar dalam dunia pendidikan biologi. Di satu sisi, pemahaman epigenetik semakin penting bagi mahasiswa dan guru dalam menyikapi kompleksitas genetika modern. Di sisi lain, perkembangan metodologi epigenetik mutakhir memberikan peluang besar untuk memperkuat pembelajaran berbasis konsep, riset, dan literasi biologi molekuler. Integrasi antara bukti biomedis, metode penelitian epigenetik terbaru, dan kebutuhan pedagogis menjadikan konsep epigenetik bukan hanya bagian dari genetika, tetapi sebagai fondasi penting dalam memahami hubungan gen–lingkungan dan implikasinya dalam sains, kesehatan, serta kurikulum biologi masa kini.

KESIMPULAN DAN SARAN

Tinjauan literatur ini menegaskan bahwa mekanisme epigenetik meliputi metilasi DNA, modifikasi histon, dan regulasi RNA non-coding memiliki peran sentral dalam mengatur ekspresi gen secara dinamis melalui interaksi gen lingkungan, sekaligus berkontribusi pada pemahaman biologi modern yang lebih komprehensif. Integrasinya dalam pendidikan biologi terbukti mampu memperkaya literasi molekuler, menguatkan keterampilan berpikir kritis, serta membantu siswa memahami bahwa genetika bersifat plastis dan tidak deterministik. Oleh karena itu, konsep epigenetik perlu lebih sistematis dimasukkan ke dalam kurikulum dan bahan ajar melalui pendekatan pembelajaran kontekstual dan berbasis fenomena. Selain itu, diperlukan pengembangan media pembelajaran, modul visual, serta penelitian lanjutan tentang efektivitas integrasi epigenetik pada berbagai jenjang pendidikan agar penerapannya tidak hanya relevan secara teoritis, tetapi juga memberikan dampak nyata dalam peningkatan kualitas pembelajaran biologi di Indonesia.

DAFTAR REFERENSI

- Binder, E. B. (2024). *Linking environmental factors and gene regulation.* 10–12.
<https://doi.org/10.7554/eLife.89371>

KONSEP EPIGENETIK DALAM REGULASI EKSPRESI GEN DAN IMPLIKASINYA BAGI PEMBELAJARAN BIOLOGI: TINJAUAN LITERATUR SISTEMATIS

- Dwi Lunarta Docterina Sutanti Siahaan, H. L. (2025). Epigenetik Dan Penuaan (Aging): Peluang Intervensi Molekuler Untuk Hidup Sehat Lebih Lama. *Majalah Ilmiah Methoda*, 15(April), 62–68.
- Ewen, B. M. (2022). Construction of a Review About Epigenetics for Biology Teachers and Other Non - experts. *Science & Education*, 997–1026.
<https://doi.org/10.1007/s11191-021-00278-z>
- Gibney, E. R., & Nolan, C. M. (2010). Epigenetics and gene expression. *Heredity*, 4–13.
<https://doi.org/10.1038/hdy.2010.54>
- Hamilton, J. P. (2011). *Epigenetics : Principles and Practice*. 130–135.
<https://doi.org/10.1159/000323874>
- Hidayah, N. (2024). Regulasi transkripsi pada ekspresi gen. *TRIMURTI: Jurnal Ilmu Kedokteran Dan Islam*.
- Kang, J., Daines, J. R., Warren, A. N., & Cowan, M. L. (2019). *Tips & Tools Epigenetics for the 21st-Century Biology Student*. 20(3).
- Li, Y. (2022). *Modern Epigenetics Methods in Biological Research*. 104–113.
<https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.06.022>
- Meza-menchaca, T., Albores-medina, A., Heredia-mendez, A. J., & Ru, E. (2024). *Revisiting Epigenetics Fundamentals and Its Biomedical Implications*.
- Page, M. J., Mckenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, 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., ... Moher, D. (2021). *The PRISMA 2020 statement : an updated guideline for reporting systematic reviews Systematic reviews and Meta-Analyses*. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Resendiz, R., Epigenet, C., Monserrat, A., Resendiz, R., Nayeli, I., García, G., Juárez, M. L., Arroyo, I. C., Cerbón, M., Ricardo, E., & Martínez, V. (2021). The role of epigenetic mechanisms in the regulation of gene expression in the cyclical endometrium. *Clinical Epigenetics*, 1–23. <https://doi.org/10.1186/s13148-021-01103-8>
- Venkatesh, I., & Makky, K. (2020). *Teaching Epigenetic Regulation of Gene Expression Is Critical in 21st-Century Science Education : Key Concepts & Teaching*

Strategies “As with all fields that experience sudden , rapid growth , the scientific data and literature on epigenetics are ever ev. 82(6), 372–380.