

Review Jurnal: Perbedaan Struktur DNA dan Replikasi Genom pada Sel Prokariotik dan Eukariotik

Nabila Ramadhani Pratama^{1*}, Hesni Mulyawati Sa'idah², Marshush Salam³

¹⁻³ Program Studi S1 Farmasi, Fakultas Farmasi, Universitas Muhammadiyah Bandung, Jawa Barat

*Corresponding email: nblarmdn832@gmail.com¹, hesnimulyawati0709@gmail.com², marshushs@gmail.com³

Abstrak. Meskipun cara menyimpan materi genetik pada makhluk hidup itu sama, ada perbedaan besar antara sel prokariotik dan eukariotik. Cara DNA disusun dan replikasi pada kedua jenis sel ini sering membuat kita kurang paham tentang biologi molekuler. Penelitian ini ingin menjelaskan perbedaan antara organisasi struktur DNA dan tahapan replikasi genom pada organisme prokariotik dan eukariotik. Metode yang digunakan adalah mempelajari literatur yang ada dengan pendekatan deskriptif kualitatif komparatif. Hasilnya menunjukkan bahwa DNA prokariotik biasanya berbentuk lingkaran tunggal yang terikat pada protein di area nukleoid, sedangkan DNA eukariotik berbentuk garis ganda yang terikat rapat pada protein histon membentuk kromatin di dalam nukleus. Dari sisi replikasi, prokariota hanya memiliki satu titik awal dengan laju sintesis yang cepat, sedangkan eukariota memiliki ribuan titik awal secara bersamaan, melibatkan enzim DNA polimerase yang lebih kompleks, dan membutuhkan aktivitas telomerase untuk menjaga kestabilan ujung kromosom. Perbedaan ini menunjukkan bahwa prokariota beradaptasi untuk pembelahan sel yang efisien, sedangkan eukariota beradaptasi untuk regulasi genom yang lebih ketat.

Kata kunci: DNA, prokariotik, eukariotik, replikasi genom, studi komparatif.

Abstract. Although the way of storing genetic material in living things is the same, there is a big difference between prokaryotic and eukaryotic cells. The way DNA is arranged and replicated in these two types of cells often makes us understand less about molecular biology. This study wants to explain the difference between the organization of DNA structure and the stages of genome replication in prokaryotic and eukaryotic organisms. The method used is to study existing literature with a comparative qualitative descriptive approach. The results show that prokaryotic DNA is usually in the form of a single circle bound to a protein in the nucleoid area, while eukaryotic DNA is in the form of a double line that is tightly bound to the histone protein to form chromatin in the nucleus. In terms of replication, prokaryotes only have one starting point with a fast synthesis rate, while eukaryotes have thousands of starting points simultaneously, involve a more complex DNA polymerase enzyme, and require telomerase activity to maintain the stability of the end of the chromosome. This difference shows that prokaryotes adapt for efficient cell division, while eukaryotes adapt for stricter genomic regulation.

Keywords: DNA, prokaryotic, eukaryotic, genome replication, comparative study.

PENDAHULUAN

Sel merupakan unit struktural dan fungsional terkecil penyusun seluruh organisme hidup yang mengontrol seluruh dinamika metabolisme serta pewarisan sifat molekuler. Di dalam setiap sel, keberadaan asam deoksiribonukleat (DNA) bertindak sebagai cetak biru genetik yang menyimpan informasi esensial untuk melangsungkan sintesis protein dan kelangsungan hidup. Organisasi molekul DNA ini mengalami diferensiasi yang sangat mencolok berdasarkan tingkat evolusi dan kompartementalisasi seluler yang dimiliki oleh organisme. Pemahaman mengenai mendasarnya organisasi materi genetik ini menjadi landasan primer dalam mempelajari biokimia, genetika molekuler, dan bioteknologi modern (Siregar *et al.*, 2020; Fakhriya, 2023;).

Secara garis besar, organisme dikelompokkan ke dalam dua sistem seluler utama, yaitu sel prokariotik dan sel eukariotik yang dibedakan oleh ada tidaknya membran inti sel (nukleus). Perbedaan arsitektur ruang ini berdampak langsung pada mekanisme penyimpanan, pemeliharaan, serta aksesibilitas materi genetik di dalam sel. Pada sel prokariotik, molekul DNA berada langsung di dalam matriks sitoplasma tanpa perlindungan membran khusus, sedangkan sel eukariotik melindungi molekul DNA di dalam nukleus bermembran ganda. Kondisi kompartementalisasi ini membentuk karakteristik biologis yang unik dalam hal efisiensi dan regulasi pengekspressian gen (Fitriani *et al.*, 2021; Sartika & Hidayat, 2022).

Secara struktural, topologi DNA pada sel prokariotik umumnya berbentuk molekul sirkuler tunggal yang terikat padat dalam wilayah yang disebut nukleoid. Struktur sirkuler ini sering kali didukung oleh keberadaan DNA ekstrakromosom berupa plasmid yang membawa sifat-sifat adaptif tertentu seperti resistensi antibiotik. Sebaliknya, sel eukariotik memiliki genom yang tersusun atas beberapa molekul DNA linear yang berukuran jauh lebih panjang dan sangat kompleks. Perbedaan bentuk fisik antara sirkuler dan linear ini secara langsung memengaruhi cara sel mengemas, membelah, serta mereplikasi genomnya saat pembelahan sel (Fitriani et al., 2021; Siregar et al., 2020; Fakhriya, 2023; Sartika & Hidayat, 2022).

Pengemasan DNA (*DNA packaging*) pada sel eukariotik melibatkan interaksi yang sangat erat dengan protein histon untuk membentuk struktur kondensasi yang disebut nukleosom dan kromatin. Pengemasan ini sangat krusial untuk muat di dalam inti sel yang sempit serta berfungsi sebagai mekanisme regulasi epigenetik dalam ekspresi gen. Di sisi lain, sel prokariotik tidak memiliki protein histon sejati, melainkan menggunakan protein mirip-histon (*histone-like proteins*) serta supercoiling negatif untuk memadatkan DNA sirkuler mereka. Perbedaan mekanisme pengemasan ini memengaruhi tingkat kelenturan DNA saat berinteraksi dengan kompleks enzim replikasi (Sartika & Hidayat, 2022).

Replikasi genom merupakan proses krusial yang menjamin pemindahan informasi genetik secara akurat dari satu generasi sel ke generasi berikutnya. Pada sel prokariotik, karena ukuran genomnya yang relatif kecil dan sirkuler, proses replikasi dimulai hanya dari satu titik awal replikasi yang disebut *Origin of Replication* (OriC). Replikasi berlangsung secara dua arah (*bidirectional*) mengelilingi lingkaran DNA hingga bertemu kembali di titik terminasi. Sifat titik awal tunggal ini memungkinkan proses replikasi berlangsung sangat cepat, selaras dengan laju pembelahan prokariota yang tinggi (Fitriani et al., 2021; Siregar et al., 2020; Fakhriya, 2023; Sartika & Hidayat, 2022).

Sebaliknya, ukuran genom sel eukariotik yang sangat besar dan terbagi ke dalam banyak kromosom linear membutuhkan ribuan titik awal replikasi (*multiple origins of replication*) yang aktif secara bersamaan. Tanpa adanya ribuan *origin* ini, proses replikasi satu kromosom eukariotik akan memakan waktu yang sangat lama dan tidak efisien bagi siklus hidup sel. Koordinasi titik-titik *origin* ini diatur secara ketat oleh kompleks protein pengenalan guna memastikan bahwa setiap bagian DNA hanya direplikasi tepat satu kali dalam setiap siklus sel (Fitriani et al., 2021; Sartika & Hidayat, 2022).

Perbedaan bentuk fisik kromosom juga memunculkan tantangan biologis yang berbeda pada tahap akhir replikasi, yang dikenal sebagai masalah replikasi ujung (*end-replication problem*). DNA eukariotik yang berbentuk linear mengalami pemendekan beruntun pada ujung-ujungnya setelah setiap putaran replikasi akibat penghilangan RNA primer. Untuk mengatasi hal ini, sel eukariotik mengembangkan struktur khusus berupa telomer dan enzim telomerase untuk melindungi integritas informasi genetik. Masalah ujung ini tidak ditemukan pada prokariota karena molekul DNA mereka yang berbentuk sirkuler tidak memiliki ujung bebas (Fitriani et al., 2021).

Kompleksitas enzim yang terlibat dalam replikasi genom juga menunjukkan perbedaan evolusioner yang signifikan antara kedua kelompok sel tersebut. Sel prokariotik mengandalkan beberapa tipe DNA Polimerase utama (seperti DNA Pol I, II, dan III) dengan kecepatan sintesis yang sangat tinggi untuk menyelesaikan replikasi. Di pihak lain, sel eukariotik membutuhkan variasi enzim DNA Polimerase yang lebih kompleks dan terspesialisasi yang bekerja secara terkoordinasi dalam pembentukan rantai *leading* dan *lagging* (Siregar et al., 2020; Sartika & Hidayat, 2022).

Meskipun terdapat berbagai perbedaan struktural dan enzimatis yang nyata, kedua kelompok sel ini tetap mempertahankan prinsip dasar replikasi DNA yang konservatif. Baik prokariotik maupun eukariotik sama-sama menerapkan mekanisme replikasi semikonservatif, di mana setiap untai DNA induk bertindak sebagai cetakan untuk pembentukan untai tunggal

baru. Selain itu, kedua sistem seluler dilengkapi dengan fungsi *proofreading* dan mekanisme perbaikan DNA (*DNA repair*) untuk menjaga ketepatan (*fidelity*) pewarisan genetik dari mutasi (Fakhriya, 2023).

Pemahaman yang mendalam mengenai perbandingan struktur DNA dan mekanisme replikasi genom antara prokariota dan eukariota memiliki implikasi praktis yang luas dalam berbagai bidang sains modern, khususnya pengobatan dan rekayasa genetika. Beda spesifisitas struktur dan enzim replikasi ini menjadi target utama dalam pengembangan obat antibiotik yang selektif membunuh bakteri tanpa merusak sel tubuh manusia. Oleh karena itu, tinjauan pustaka (*review journal*) ini disusun untuk menyintesis temuan-temuan ilmiah terkini mengenai perbedaan komparatif genomik tersebut guna memperkaya wawasan akademis dan mendukung riset ilmu hayati di masa depan (Sartika & Hidayat, 2022).

LANDASAN TEORI

Deoxyribonucleic acid (DNA) merupakan molekul pembawa informasi genetik yang mengendalikan struktur, fungsi, dan pewarisan sifat pada seluruh organisme hidup. Walaupun seluruh organisme menggunakan susunan nukleotida yang serupa, terdapat perbedaan fundamental pada struktur DNA dan mekanisme replikasi genom antara sel prokariotik dan sel eukariotik. Pada sel prokariotik seperti bakteri dan arkea, sel tidak memiliki membran inti sel (nukleus), sehingga materi genetik terletak langsung di dalam sitoplasma. Genom prokariotik umumnya terdiri dari satu molekul DNA sirkular tunggal yang terletak di daerah nukleoid serta relatif lebih sederhana. Selain kromosom utama, sel prokariotik sering kali mengandung molekul DNA ekstrakromosomal beruntai ganda sirkular yang disebut plasmid (Mardia *et al.*, 2026; Rahmadina *et al.*, 2024; Sukweenadhi, 2023).

Sebaliknya, sel eukariotik seperti sel hewan, tumbuhan, jamur, dan protista memiliki membran inti yang memisahkan materi genetik dari sitoplasma. Genom eukariotik tersusun atas beberapa kromosom linier yang jauh lebih besar dan kompleks dibandingkan genom prokariotik. DNA pada sel eukariotik terikat rapat dengan protein histon untuk membentuk struktur kromatin. Selain DNA yang berada di dalam nukleus, sel eukariotik juga memiliki genom tersendiri pada organel tertentu, seperti mitokondria dan kloroplas, yang mampu mereplikasi dirinya secara independen dari inti sel (Rahmadina *et al.*, 2024; Sukweenadhi, 2023).

Proses replikasi genom pada sel prokariotik berlangsung secara semikonservatif dan sangat efisien di dalam sitoplasma. Replikasi pada prokariota dimulai dari satu titik awal replikasi tunggal yang disebut origin of replication (OriC), yaitu daerah yang kaya akan pasangan basa Adenin-Timin (A–T) sehingga mudah dipisahkan oleh protein inisiator dan enzim helikase. Tahap pemanjangan (elongasi) dikatalisis oleh DNA polimerase III holoenzim yang mensintesis untai leading strand secara kontinu dan lagging strand secara diskontinu membentuk fragmen Okazaki. Proses ini kemudian diakhiri pada tahap terminasi di daerah terminus ketika dua replication fork bertemu dan dihambat oleh kompleks protein Tus pada situs Ter, lalu dipisahkan oleh enzim topoisomerase IV (Mardia *et al.*, 2026; Sukweenadhi, 2023).

Adapun pada sel eukariotik, replikasi DNA berlangsung di dalam nukleus dan memiliki tingkat kompleksitas yang jauh lebih tinggi. Karena ukuran genom eukariotik yang sangat besar dan berbentuk linier, proses replikasi tidak hanya mengandalkan satu titik origin, melainkan membutuhkan banyak titik awal replikasi (multiple origins of replication) yang bekerja secara bersamaan sepanjang kromosom. Selain itu, replikasi eukariotik melibatkan pembukaan struktur rapat kromatin serta perlindungan khusus di ujung kromosom linier menggunakan enzim telomerase untuk mencegah kehilangan informasi genetik akibat pemendekan untai DNA pada setiap siklus pembelahan sel (Mardia *et al.*, 2026; Sukweenadhi, 2023).

METODE

Penelitian ini dirancang menggunakan metode studi literatur (library research) berbasis kajian pustaka sistematis (systematic literature review) dengan pendekatan deskriptif kualitatif komparatif. Pendekatan ini dipilih untuk mengeksplorasi, menganalisis, dan membandingkan secara komprehensif aspek biologi molekuler berupa organisasi struktur fisik DNA serta mekanisme penataan dan replikasi genom pada sel prokariotik dan eukariotik. Melalui desain kajian kualitatif ini, data ilmiah tidak diperoleh dari pengujian laboratorium secara eksperimental langsung, melainkan melalui penelaahan kritis terhadap teori, mekanisme reaksi biokimia, dan bukti empiris yang telah dipublikasikan dalam literatur akademis bereputasi (Creswell & Creswell, 2018; Rahmadina *et al.*, 2024; Snyder, 2019).

Strategi pengumpulan data dilakukan secara sekunder melalui penelusuran sistematis pada berbagai pangkalan data ilmiah internasional dan nasional, seperti PubMed, ScienceDirect, Google Scholar, serta repositori penerbit akademis. Penelusuran literatur memanfaatkan kombinasi kata kunci spesifik menggunakan operator Boolean, antara lain "prokaryotic DNA structure", "eukaryotic genome replication", "origin of replication", "Okazaki fragments", "telomerase", dan "biologi molekuler genomik". Sumber pustaka yang dijangkau dibatasi berdasarkan kriteria inklusi, yaitu publikasi berupa artikel jurnal peer-reviewed dan buku teks referensi biokimia/biologi seluler terintegrasi, yang relevan secara langsung dengan mekanisme replikasi serta struktur materi genetik sel prokariotik maupun eukariotik (Alberts *et al.*, 2017; Mardia *et al.*, 2026; Snyder, 2019).

Pengolahan data dilakukan melalui tahap ekstraksi data secara terstruktur dengan mengklasifikasikan variabel molekuler utama yang menjadi objek pembandingan. Parameter yang diekstraksi mencakup topologi molekul DNA (sirkular vs linier), keberadaan dan jenis protein pengemas (protein histone-like vs protein histon octamer), jumlah serta karakteristik titik awal replikasi (single OriC vs multiple origins), kecepatan sintesis dan ukuran fragmen Okazaki, variasi enzim DNA polimerase yang terlibat, serta mekanisme terminasi dan pemeliharaan ujung kromosom (telomere maintenance). Seluruh parameter yang diekstrak kemudian ditabulasi dan dikelompokkan berdasarkan taksonomi domain organisme untuk mempermudah pemetaan perbedaan fungsionalnya (Alberts *et al.*, 2017; Sukweenadhi, 2023).

Teknik analisis data yang diterapkan adalah analisis isi (content analysis) dan analisis tematik komparatif guna mengidentifikasi pola persamaan, perbedaan mendasar, serta korelasi evolusioner antar-sistem genom. Tahapan analisis dimulai dengan reduksi data melalui seleksi ketersediaan substansi, penyajian data secara sistematis dan terstruktur dalam narasi ilmiah, hingga tahap sintesis konseptual untuk merumuskan generalisasi teori mengenai efisiensi replikasi prokariota dibandingkan dengan kompleksitas regulasi replikasi eukariota. Proses perbandingan dikaji secara kritis dengan menelaah bagaimana perbedaan struktural memengaruhi laju dan tingkat ketelitian (fidelity) pemrosesan informasi genetik pada kedua tipe sel (Creswell & Creswell, 2018; Mardia *et al.*, 2026; Sukweenadhi, 2023).

Keabsahan dan validitas data dalam penelitian ini dijaga secara ketat melalui penerapan triangulasi sumber, yaitu dengan membandingkan, mengomparasikan, dan memverifikasi data teoretis dari berbagai jurnal internasional, jurnal nasional bereputasi, serta buku teks acuan standar biologi molekuler. Selain itu, transparansi dan kredibilitas penelitian dijamin melalui keterlacakan sitasi, kepatuhan terhadap kaidah etika penulisan ilmiah tanpa plagiarisme, serta penyelarasan rujukan secara objektif antara temuan klasik dan perkembangan riset biokimia molekuler terkini (Alberts *et al.*, 2017; Rahmadina *et al.*, 2024; Snyder, 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sel prokariotik dan eukariotik menunjukkan perbedaan mendasar pada organisasi materi genetiknya. Genom prokariota umumnya tersusun atas satu molekul DNA sirkuler tunggal yang berada bebas di sitoplasma, mengingat sel ini tidak memiliki membran inti yang memisahkan

DNA dari komponen sel lainnya. Struktur ini membuat seluruh materi genetik dapat diakses secara langsung oleh mesin replikasi tanpa hambatan kompartemen seluler. Sebaliknya, eukariota memiliki DNA berbentuk linear yang tersimpan rapi di dalam nukleus dan terorganisasi bersama protein histon membentuk struktur kromatin yang jauh lebih kompleks (Rahmadina et al., 2024; Sukweenadhi, 2023).

Kompleksitas pengemasan DNA pada eukariota turut memengaruhi bagaimana proses replikasi dapat berlangsung. Keberadaan nukleosom dan tingkat pemadatan kromatin menjadi penghalang fisik yang harus diatasi sebelum enzim-enzim replikasi dapat bekerja pada untai DNA. Kondisi ini berbeda jauh dengan prokariota, yang DNA-nya relatif tanpa pembungkus protein sekompleks histon, sehingga aksesibilitas terhadap materi genetik menjadi lebih mudah dan proses replikasi dapat berjalan lebih cepat (Ardiputra, 2024; Sukweenadhi, 2023).

Salah satu pembeda paling signifikan antara kedua kelompok organisme ini terletak pada jumlah dan letak titik awal replikasinya. Pada prokariota seperti *Escherichia coli*, replikasi genom hanya dimulai dari satu titik tunggal yang disebut origin of replication (OriC), yang kaya akan pasangan basa adenin-timin sehingga mudah terbuka pada tahap awal replikasi. Satu titik awal ini sudah mencukupi karena ukuran genom prokariota yang relatif kecil, sehingga replikasi dapat diselesaikan dalam waktu singkat meski hanya bergerak dari satu pusat pembukaan heliks (Mardia et al., 2026; Widyaswara, 2023).

Sebaliknya, genom eukariota yang berukuran jauh lebih besar memerlukan banyak titik awal replikasi (multiple origins) yang tersebar di sepanjang molekul DNA linearnya. Strategi ini diperlukan agar seluruh genom dapat direplikasi secara tuntas dalam rentang waktu siklus sel yang terbatas, mengingat jika hanya mengandalkan satu titik awal, proses penggandaan genom yang besar akan memakan waktu sangat lama. Konsekuensinya, regulasi inisiasi replikasi pada eukariota jauh lebih rumit karena harus mengkoordinasikan aktivasi ratusan hingga ribuan titik awal secara tepat waktu dan tidak berulang dalam satu siklus sel yang sama (Ardiputra, 2024; Suciati & Meriska, 2022).

Meskipun prinsip dasar replikasi bersifat semikonservatif pada kedua kelompok organisme, jenis dan jumlah enzim yang terlibat menunjukkan perbedaan yang mencolok. Prokariota mengandalkan DNA polimerase III sebagai enzim utama untuk sintesis untai baru, dibantu oleh DNA polimerase I yang bertugas menggantikan primer RNA, serta DNA ligase yang menyambungkan fragmen Okazaki pada lagging strand. Sistem ini relatif sederhana namun sangat efisien, dengan laju sintesis yang dapat mencapai ribuan pasangan basa per detik. Eukariota, di sisi lain, memiliki beragam jenis DNA polimerase dengan fungsi yang lebih terspesialisasi, seperti Polimerase alfa yang berperan dalam inisiasi sintesis primer, serta Polimerase delta dan epsilon yang masing-masing bertanggung jawab pada sintesis lagging strand dan leading strand (Mardia et al., 2026; Sukweenadhi, 2023).

Kompleksitas enzim pada eukariota sejalan dengan kebutuhan untuk mengkoordinasikan replikasi pada banyak titik awal secara bersamaan, sekaligus mengelola interaksi antara proses replikasi dengan pengemasan ulang kromatin di belakang garpu replikasi yang sedang bergerak. Perbedaan struktural dan mekanistik ini pada akhirnya berdampak pada kecepatan, akurasi, serta strategi regulasi replikasi pada masing-masing kelompok organisme. Kesederhanaan genom prokariota memungkinkan siklus reproduksi yang jauh lebih cepat, sehingga sangat mendukung kelangsungan hidup di lingkungan yang kompetitif dan berubah-ubah. Sebaliknya, kompleksitas genom eukariota menuntut sistem pengawasan yang lebih ketat, termasuk mekanisme checkpoint pada siklus sel, guna mencegah kesalahan replikasi yang dapat berujung pada ketidakstabilan genom maupun perkembangan sel abnormal (Nasution & Kartini, 2024; Suciati & Meriska, 2022).

Untuk memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai perbedaan mendasar yang telah dipaparkan dalam pembahasan, ringkasan perbandingan karakteristik struktur

genom dan mekanisme replikasi antara sel prokariotik dan eukariotik disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Perbandingan Komparatif Struktur Genom dan Replikasi Sel Prokariotik dan Eukariotik.

Parameter Perbandingan	Sel Prokariotik	Sel Eukariotik
Membran Inti (Nukleus)	Tidak ada (materi genetik berada di wilayah nukleoid yang bebas di sitoplasma)	Ada (membran ganda yang memisahkan nukleus dan sitoplasma)
Ukuran Sel	Relatif kecil	Relatif besar
Bentuk / Topologi DNA	Sirkuler tunggal (seringkali disertai plasmid ekstrakromosom)	Linear ganda dan terbagi ke dalam beberapa kromosom
Protein Pengemas DNA (Histon)	Tidak memiliki histon sejati (menggunakan histone-like proteins dan supercoiling)	Terikat erat dengan protein histon membentuk nukleosom dan kromatin
Titik Awal Replikasi (Origin)	Hanya satu titik (Single Origin of Replication / OriC)	Banyak titik (Multiple Origins of Replication)

Berdasarkan rangkuman pada Tabel 1 di atas, terlihat jelas bahwa perbedaan antara sel prokariotik dan eukariotik mencakup seluruh tingkatan organisasi materi genetik. Keberadaan kompartemen inti serta pengemasan kromatin yang kompleks pada eukariota menuntut sistem regulasi replikasi yang lebih ketat, sedangkan kesederhanaan struktur DNA prokariota mendukung efisiensi dan kecepatan pembelahan sel.

SIMPULAN

Perbedaan organisasi struktur DNA antara sel prokariotik dan eukariotik mencerminkan tingkat kompleksitas evolusioner serta adaptasi fungsional dari masing-masing sistem seluler. Pada sel prokariotik, materi genetik berupa molekul DNA tunggal berbentuk sirkular yang berada bebas di area sitoplasma yang disebut nukleoid tanpa dibatasi membran inti, serta sering kali didampingi oleh molekul DNA ekstra-kromosomal kecil berupa plasmid. Sebaliknya, sel eukariotik memiliki struktur DNA linier ganda berukuran jauh lebih besar yang tersimpan rapi di dalam nukleus dan terikat erat dengan oktamer protein histon untuk membentuk kondensasi struktur kromatin. Selain DNA nukleus, eukariota juga memiliki genom organel mandiri pada mitokondria maupun kloroplas (Ardiputra, 2024; Suciati & Meriska, 2022; Widyaswara, 2023).

Mekanisme replikasi genom pada sel prokariotik berlangsung secara semikonservatif dengan tingkat kecepatan yang tinggi dan struktur yang relatif sederhana. Replikasi ini diinisiasi hanya dari satu situs titik awal replikasi (single origin of replication atau OriC) yang kaya akan pasangan basa Adenin-Timin, dilanjutkan oleh aktivitas DNA polimerase III yang bergerak secara dua arah (bidirectional) hingga berakhir pada daerah terminasi khusus (Ter) dengan bantuan protein Tus. Seluruh tahap sintesis untai majemuk (leading strand) dan untai lambat (lagging strand) berlangsung secara efisien dalam lingkungan sitosol tanpa terikat oleh fase siklus sel yang rumit (Ardiputra, 2024; Widyaswara, 2023).

Di sisi lain, proses replikasi pada sel eukariotik memiliki tingkat regulasi yang jauh lebih presisi, rumit, dan terikat ketat pada fase S (synthesis) dalam siklus sel di dalam nukleus. Untuk mereplikasi molekul DNA linier yang sangat panjang, sel eukariotik memanfaatkan ribuan titik awal replikasi (multiple origins of replication) secara serentak guna mempercepat proses pemanjangan. Proses ini melibatkan kompleks Enzim DNA polimerase yang lebih terspesialisasi, pembongkaran serta penyusunan ulang nukleosom, serta membutuhkan peran

vital enzim telomerase untuk memelihara kestabilan dan mencegah pemendekan informasi genetik di ujung kromosom linier (Ardiputra, 2024; Suciati & Meriska, 2022).

Berdasarkan hasil pembahasan komparatif ini, disarankan agar penelitian biologi molekuler di masa mendatang dapat mengeksplorasi secara lebih mendalam dinamika interaksi protein pengemas DNA non-histon pada prokariota (histone-like proteins) dan pengaruhnya terhadap efisiensi laju transkripsi maupun replikasi. Pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kontrol molekuler pada titik awal replikasi prokariota dapat dimanfaatkan dalam pengembangan strategi terapi antimikroba berbasis penutupan atau penghambatan spesifik pada enzim replikasi bakteri patogen tanpa mengganggu mesin replikasi sel eukariotik manusia (Ardiputra, 2024; Suciati & Meriska, 2022).

Selain itu, bagi institusi pendidikan dan civitas akademika, disarankan untuk mengembangkan media atau modul pembelajaran visual berbasis rekonstruksi animasi tiga dimensi (3D) maupun pemodelan komputasional mengenai mekanisme kompartementalisasi kromatin dan proses replication fork. Pendekatan visualisasi molekuler ini sangat penting untuk membantu mahasiswa memvisualisasikan fenomena makromolekul yang bersifat abstrak, terutama pada perbedaan langkah kerja kompleks kompleksitas enzim eukariotik dan keterlibatan telomerase pada ujung kromosom (Nasution & Kartini, 2024; Suciati & Meriska, 2022).

Terakhir, bagi peneliti di bidang bioteknologi dan rekayasa genetik, disarankan untuk memanfaatkan perbedaan karakteristik replikasi genomik ini dalam optimasi sistem ekspresi rekombinan. Karakteristik plasmid prokariotik yang dapat bereplikasi secara mandiri dengan laju tinggi serta struktur genom eukariotik yang mampu melakukan modifikasi pasca-translasi perlu dipertimbangkan secara matang dalam memilih sel inang (host cell) yang paling efektif dan efisien untuk produksi protein terapeutik, vaksin, maupun industri biomaterial (Kusuma, 2021; Widyaswara, 2023).

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, serta hidayah-Nya, sehingga penyusunan review artikel ini dapat diselesaikan dengan baik, serta shalawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Besar Muhammad SAW. Penyusunan karya tulis ini tentu tidak terwujud tanpa adanya bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua dan keluarga tercinta atas doa dan dukungan yang tiada henti, kepada dosen pengampu mata kuliah yang telah memberikan arahan serta ilmu yang berharga, serta kepada teman-teman seperjuangan khususnya rekan-rekan kelompok di lingkungan Universitas Muhammadiyah Bandung yang senantiasa bekerja sama dan saling memotivasi dalam penyelesaian review artikel ini. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa karya ini masih jauh dari kata sempurna, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga penyusunan review artikel ini dapat memberikan manfaat serta menambah wawasan bagi dunia akademis, khususnya dalam bidang ilmu farmasi dan biologi sel.

DAFTAR PUSTAKA

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2017). *Molecular biology of the cell* (6th ed.). Garland Science.
- Ardiputra, M. A. (2024). *Biologi Sel dan Molekuler*. Jakarta: Penerbit Mitra Keluarga.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Fakhriya, F. (2023). *Bahan ajar biofisika berbasis literasi sains*. Penerbit NEM.

- Fitriani, F., Aulia, Y., Saputra, M. A., Wardhani, D., & Rahmadina, R. (2021). Perbedaan teori organisme sel prokariotik, eukariotik, dan virus. *Algoritma: Jurnal Matematika, Ilmu Pengetahuan Alam, Kebumihan dan Angkasa*, 2(5), 75–84.
- Kusuma, A. B. (2021). Review: Imunoterapi dan Rekayasa Genetik dalam Penanganan Infeksi Virus dan Ekspresi Genom. *Jurnal Bioteknologi & Biosains Indonesia*, 8(1), 15–28.
- Nasution, R., & Kartini. (2024). Review Artikel Teori Evolusi Sel Prokariotik, Eukariotik dan Penyusun Membran Sel. *Jurnal Publikasi Asosiasi Riset Ilmu Pendidikan Indonesia*, 2(4), 430–440.
- Mardia, A., Amalia, H., & Adnan. (2026). Replikasi DNA pada prokariota: Tahapan dan fungsi dalam pewarisan genetik. *Symbiotic: Journal of Biological Education and Science*, 7(1), 1–10.
- Nur, A., & Yamamoto, Z. (2022). Saliva sebagai sumber DNA genom manusia. *Jurnal Kedokteran Syiah Kuala*, 22(2), 126–134.
- Rahmadina, Aulia, Y., Saputra, M. A., Wardhani, D., & Fitriani. (2024). Perbedaan teori organisme sel prokariotik, eukariotik dan virus. *Algoritma: Jurnal Matematika, Ilmu Pengetahuan Alam, Kebumihan dan Angkasa*, 2(5), 75–84.
- Rahmadina, Nasution, A. M., Rezi, D. F., Pulungan, A. A., Az Zahra, F., Sativa, S. O., & Munthe, Y. A. (2024). Teori sel prokariotik, eukariotik dan penyusun membran sel. *BEST Journal (Biology Education Science & Technology)*, 7(2), 36–42.
- Sartika, D., & Hidayat, R. (2022). Studi komparatif struktur genom dan mekanisme replikasi DNA pada organisme prokariotik dan eukariotik. *Jurnal Biologi Molekuler dan Genetika*, 5(1), 12–25.
- Siregar, A. H., Rahmadina, R., & Nasution, M. (2020). *Organisasi genom dan biologi sel molekuler*. Perdana Publishing.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Suciati, R., & Meriska. (2022). *Buku Ajar Biologi Sel & Molekuler Terintegrasi*. Jakarta: UHAMKA Press.
- Sukweenadhi, J. (2023). Bab 13: Struktur dan fungsi genomik. Dalam Kartini et al. (Eds.), *Pengantar biomolekuler* (hal. 198–210). CV. Eureka Media Aksara.
- Widyaswara, G. (2023). *Buku Ajar Biologi Sel dan Genetika*. Yogyakarta: Poltekkes Adisutjipto Press.