

Mechanisms of Substance Transport Across the Cell Membrane: Diffusion, Osmosis, and Active Transport

Azizah Amalia Abbas¹, Lutfitri Rahmadani¹, Fransiska Petronela Sepe¹, Yohanes Mari Ba'i Leta¹, Veronika P. Sinta Mbia Wae^{1*}

¹Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Flores, Ende, Nusa Tenggara Timur, Indonesia;

Article History

Received : December 10th, 2025

Revised : January 14th, 2026

Accepted : January 21th, 2026

*Corresponding Author: **Veronika P. Sinta Mbia Wae**, Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Flores, Ende, Nusa Tenggara Timur, Indonesia
Email:

veronikapsmwae88@gmail.com

Abstract: The cell membrane is a semipermeable structure that regulates substance exchange between intracellular and extracellular environments, maintains cellular homeostasis, and supports metabolic processes, yet the fundamental mechanisms of diffusion, osmosis, and active transport are still frequently misunderstood in both theoretical and educational contexts. This study aims to comprehensively review substance transport mechanisms across the cell membrane and their relevance to biology education and contemporary cellular research. This research employed a narrative literature review, analyzing scientific books and peer-reviewed journal articles published within the last five to ten years, selected from databases such as Google Scholar, PubMed, and MDPI based on topic relevance. The results indicate that diffusion facilitates molecular movement along concentration gradients either directly or through transport proteins; osmosis regulates water balance through semipermeable membranes mediated by aquaporins; and active transport enables the movement of ions and molecules against concentration gradients through ATP-dependent pumps, secondary transporters, ABC transporters, and V-ATPase. These mechanisms are interconnected and influenced by membrane composition, molecular characteristics, and transporter–substrate interactions. This review highlights the importance of an integrative understanding of membrane transport processes to strengthen conceptual learning in biology education and to support advancements in cellular and biomedical research.

Keywords: Active transport, Cell membrane, Diffusion, Osmosis.

Pendahuluan

Membran sel merupakan struktur fundamental yang berfungsi sebagai antarmuka utama dalam mengatur pertukaran zat antara lingkungan internal dan eksternal sel (Ruffinatti et al., 2023). Selektivitas membran terhadap molekul tertentu dimediasi oleh berbagai protein transpor yang memungkinkan perpindahan zat berlangsung secara terkontrol sesuai kebutuhan seluler (Carbó & Rodríguez, 2023). Regulasi transport membran ini berperan penting dalam mempertahankan homeostasis seluler serta mendukung keberlangsungan berbagai reaksi metabolik

secara optimal (Ciarimboli, 2024).

Kajian biologi sel, terdapat tiga mekanisme utama yang digunakan sel untuk memindahkan molekul melintasi membrannya, yaitu difusi, osmosis, dan transpor aktif. Difusi dan osmosis termasuk transport pasif, di mana perpindahan molekul air atau zat terlarut terjadi mengikuti gradien konsentrasi tanpa memerlukan energi (Tomkins et al., 2021). Namun, ketika sel membutuhkan pemindahan molekul melawan gradien konsentrasi, digunakanlah transpor aktif yang bergantung pada energi ATP. Mekanisme ini berperan penting dalam mempertahankan gradien ion dan fungsi fisiologis lainnya (Mishra, 2024).

Tidak hanya pada ranah teori, penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa pemahaman mengenai mekanisme transport membran masih sering menimbulkan miskonsepsi. Peserta didik, misalnya, kerap keliru membedakan difusi terfasilitasi dengan osmosis, atau menganggap bahwa seluruh bentuk transport membran membutuhkan energi (Lestari & Susantini, 2020). Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan pemahaman konseptual yang perlu dijembatani melalui penjelasan konsep yang lebih sistematis. Selain itu, studi lokal juga menegaskan bahwa penerapan praktikum osmosis dan difusi dapat meningkatkan pemahaman peserta didik terhadap proses transport membran (Yuliani *et al.*, 2021). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada identifikasi miskonsepsi atau evaluasi metode pembelajaran secara terpisah, tanpa mensintesis keterkaitan antara mekanisme transport membran pada tingkat seluler dan implikasinya terhadap pembelajaran biologi secara konseptual. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang menelaah secara integratif miskonsepsi konsep transport membran melalui pendekatan kajian pustaka untuk memperkuat pemahaman konseptual peserta didik.

Tingkat molekuler, perpindahan zat tidak hanya dipengaruhi oleh gradien konsentrasi, tetapi juga oleh keberadaan protein transpor, seperti kanal ion dan carrier, yang mengatur kecepatan dan spesifisitas pergerakan molekul. Peran protein ini sangat penting bagi homeostasis dan respon sel terhadap perubahan lingkungan (Lestari, 2025). Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini bertujuan mengkaji secara komprehensif mekanisme transportasi zat melintasi membran sel meliputi: difusi, osmosis, dan transpor aktif, berdasarkan literatur ilmiah lima tahun terakhir serta beberapa rujukan fundamental yang relevan. Kajian ini diharapkan memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai dasar biologis proses transport seluler serta relevansinya dalam pembelajaran biologi dan penelitian modern.

Bahan dan Metode

Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan kajian pustaka (literature review) yang bertujuan menganalisis dan mensintesis temuan ilmiah terkait mekanisme transportasi zat melintasi membran sel, meliputi difusi, osmosis, dan transpor aktif. Sumber data diperoleh dari artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal nasional dan internasional bereputasi.

Penelusuran literatur dilakukan melalui beberapa basis data daring, yaitu Google Scholar, PubMed, dan MDPI, guna menjangkau artikel yang relevan dan mutakhir. Kata kunci yang digunakan dalam proses pencarian meliputi: cell membrane transport, diffusion, osmosis, active transport, membrane proteins, serta padanan istilah dalam bahasa Indonesia. Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kriteria kesesuaian topik, keterbaruan publikasi (lima hingga sepuluh tahun terakhir), serta relevansi dengan fokus kajian. Dari proses seleksi tersebut, diperoleh sejumlah artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis lebih lanjut.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, meliputi identifikasi artikel, seleksi literatur, klasifikasi, dan sintesis kajian. Tahap identifikasi dilakukan dengan mengumpulkan artikel yang relevan berdasarkan kata kunci yang telah ditentukan. Selanjutnya, tahap seleksi literatur dilakukan dengan menyaring artikel berdasarkan judul, abstrak, dan isi penuh untuk memastikan kesesuaian dengan topik transport membran sel. Artikel yang lolos seleksi kemudian diklasifikasikan berdasarkan jenis mekanisme transportasi zat yang dibahas. Tahap akhir berupa sintesis kajian dilakukan dengan mengintegrasikan temuan-temuan utama dari berbagai sumber untuk memperoleh pemahaman konseptual yang komprehensif. Prosedur kajian pustaka ini mengacu pada pendekatan umum dalam penelitian kajian literatur sebagaimana dijelaskan oleh Marzali (2016) dalam Asbar (2020).

Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif-kualitatif, dengan menelaah isi artikel yang terpilih untuk mengidentifikasi konsep, mekanisme, serta temuan utama terkait transportasi zat melalui membran sel. Data dianalisis melalui proses perbandingan dan sintesis antartemuan penelitian untuk mengungkap pola, kesamaan, serta perbedaan hasil kajian. Seluruh proses analisis dilakukan secara manual dengan bantuan perangkat lunak pengolah kata untuk mengorganisasi dan menyajikan data secara sistematis.

Hasil dan Pembahasan

Tabel 1. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Difusi Molekul Melintasi Membran Sel

Faktor utama	Karakteristik	Dampak terhadap osmosis	Referensi
Ukuran molekul	Molekul kecil	Difusi lebih cepat	Frallicciardi et al., 2022
Polaritas molekul	Nonpolar	Permeabilitas tinggi	Bernardi et al., 2023
Komposisi lipid membran	Dinamis dan heterogen	Memodulasi laju difusi	Hong, 2024
Muatan & reaktivitas	Bermuatan / radikal	Hambatan kinetik dan sterik	Möller et al., 2019
Protein transpor	Kanal dan carrier	Memungkinkan difusi terfasilitasi	Sauvé et al., 2023
Struktur molekul kompleks	Makrosiklik & fleksibel	Variasi permeabilitas	Feng et al., 2025
Integrasi transport pasif-aktif	Faktor struktural & kondisi membran	Menentukan kemampuan molekul memasuki sel	Mishra et al., 2024

Keterangan: Tabel merangkum sintesis hasil kajian pustaka mengenai faktor-faktor penentu difusi molekul melalui membran sel berdasarkan literatur ilmiah

Osmosis pada Membran Sel

Hasil kajian pustaka menunjukkan bahwa osmosis pada membran sel merupakan proses transport air yang sangat dipengaruhi oleh struktur membran dan keberadaan protein kanal air. Sintesis berbagai penelitian mutakhir memperlihatkan bahwa aquaporin berperan

Difusi pada Membran Sel

Hasil kajian pustaka menunjukkan bahwa difusi pada membran sel dipengaruhi oleh kombinasi faktor fisikokimia molekul dan karakteristik struktural membran. Berdasarkan sintesis literatur ilmiah terkini, molekul berukuran kecil dan bersifat nonpolar cenderung memiliki laju difusi tertinggi, sedangkan molekul bermuatan, reaktif, atau berstruktur kompleks menunjukkan permeabilitas yang lebih rendah. Selain itu, dinamika lipid dan keterlibatan protein membran terbukti berperan penting dalam memodulasi efisiensi difusi pada berbagai sistem biologis.

dominan dalam menentukan laju dan selektivitas aliran air, terutama pada sel-sel yang membutuhkan regulasi cairan secara cepat dan presisi. Selain itu, faktor fisik membran, interaksi lipid–air, serta kondisi lingkungan seluler turut memodulasi efisiensi proses osmosis pada tingkat molekuler.

Tabel 2. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Osmosis Melalui Membran Sel

Faktor utama	Karakteristik	Dampak terhadap osmosis	Referensi
Gradien osmotik	Perbedaan konsentrasi solut	Menentukan arah aliran air	Devuyst et al., 2024
Aquaporin (AQP1)	Kanal air selektif	Mempercepat fluks air	Devuyst et al., 2024
Struktur kanal aquaporin	Jalur sempit, single-file	Selektivitas tinggi terhadap air	Vrettou et al., 2024
Interaksi lipid-protein	Lingkungan membran dimanis	Memodulasi efisiensi osmosis	Fuwad et al., 2024
Sifat fisik membrane buatan	Ukuran pori & permeabilitas	Mengatur fluks air	Mohammadifakhr et al. 2020
Dinamika lipid &	Polaritas & tegangan	Variasi laju osmosis	Möller et al., 2019

spesies reaktif	permukaan		
Struktur molekul & lingkungan lipid	Fleksibilitas & polaritas	Pengaruh pada perpindahan air	Feng et al., 2025

Keterangan: Tabel menyajikan sintesis hasil kajian pustaka mengenai faktor-faktor penentu osmosis pada membran sel berdasarkan literatur ilmiah.

Transpor Aktif pada Membran Sel

Hasil kajian pustaka menunjukkan bahwa transpor aktif pada membran sel merupakan mekanisme esensial yang memungkinkan pemindahan ion dan molekul melawan gradien konsentrasi dengan menggunakan energi metabolik, terutama ATP. Sintesis literatur ilmiah menunjukkan bahwa mekanisme ini

berperan penting dalam mempertahankan gradien elektrokimia, mendukung fungsi fisiologis utama sel, serta mengatur homeostasis internal. Berbagai jenis protein transpor aktif, baik pompa primer maupun transporter sekunder, bekerja secara terkoordinasi untuk memastikan keberlangsungan fungsi seluler dalam kondisi fisiologis yang dinamis.

Tabel 3. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Transpor Aktif Melalui Membran Sel

Faktor Utama	Karakteristik	Dampak Terhadap Transpor Aktif	Referensi
Energi metabolic (ATP)	Hidrolisis ATP	Menggerakkan tnspor melawan gradien	Contreras et al., 2024
Na ⁺ /K ⁺ -ATPase	Pompa ion primer	Mempertahankan gradient elektrokimia	Contreras et al., 2024
Transpor sekunder	Symporter & antiporter	Pemanfaatan gradien ion	Qiu et al., 2023
Perubahan konformasi protein	Struktur dinamis	Selektivitas dan efisiensi transpor	Qiu et al., 2023
ABC transporter	Pengikut ATP & domain transmembran	Transpor molekul besar	How et al., 2024
V-ATPase	Pompa proton	Regulasi pH organel	Eaton et al., 2023
Pompa H ⁺ tipe P	Gradien proton	Penyerapan nutrisi & transpor sekunder	Zhao et al., 2024
Struktur molekul substrat	Polaritas & orientasi	Menentukan pengikatan substrat	Feng et al., 2025

Keterangan: Tabel menyajikan sintesis hasil kajian pustaka mengenai faktor-faktor yang memengaruhi mekanisme transpor aktif pada membran sel berdasarkan literatur ilmiah.

Pembahasan

Difusi pada membran sel

Berdasarkan hasil kajian yang dirangkum pada Tabel 1, difusi pada membran sel tidak dapat dipahami sebagai proses pasif yang bersifat homogen. Molekul kecil dan nonpolar, seperti oksigen dan karbon dioksida, menunjukkan laju difusi yang lebih tinggi karena kemampuannya berinteraksi langsung dengan inti hidrofobik bilayer fosfolipid. Frallicciardi et al. (2022) menegaskan bahwa ukuran molekul merupakan determinan utama permeabilitas membran, sementara Bernardi et al. (2023) menunjukkan bahwa sifat nonpolar molekul berkontribusi signifikan terhadap efisiensi difusi pasif. Temuan ini menguatkan pandangan bahwa gradien

konsentrasi saja tidak cukup menjelaskan proses difusi, melainkan harus dikaji bersama dengan dinamika struktur dan komposisi membran, sebagaimana ditunjukkan dalam kajian Hong (2024).

Tingkat yang lebih kompleks, hasil kajian juga menunjukkan bahwa molekul bermuatan atau bersifat reaktif mengalami hambatan kinetik dan sterik yang memperlambat laju difusi. Möller et al. (2019) melaporkan bahwa interaksi tambahan antara molekul reaktif dan komponen membran dapat memodifikasi laju difusi sekaligus memengaruhi potensi reaktivitasnya di dalam sel. Temuan ini menunjukkan bahwa membran sel bukanlah struktur pasif, melainkan lingkungan dinamis yang mampu memodulasi proses difusi secara selektif berdasarkan

karakteristik molekul yang melintasinya.

Keterbatasan difusi sederhana tersebut mendorong sel memanfaatkan mekanisme difusi terfasilitasi melalui protein membran spesifik. Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa protein kanal dan protein pembawa berperan penting dalam menyediakan jalur hidrofilik terkontrol bagi molekul polar dan ion. Protein transpor dari kelompok major facilitator superfamily terbukti meningkatkan efisiensi perpindahan zat tanpa penggunaan energi metabolik dengan tetap mengikuti gradien konsentrasi (Sauvé *et al.*, 2023). Dengan demikian, keberadaan protein transpor menjadi faktor kunci dalam mengatasi keterbatasan difusi melalui bilayer lipid.

Selain itu, variasi permeabilitas juga ditemukan pada molekul dengan struktur kompleks. Feng *et al.* (2025) menunjukkan bahwa fleksibilitas molekul, derajat polaritas, serta struktur makrosiklik sangat memengaruhi kemampuan molekul untuk berdifusi melewati membran. Temuan ini sejalan dengan kajian integratif yang menyatakan bahwa kemampuan suatu molekul memasuki sel ditentukan oleh interaksi antara sifat struktural molekul dan kondisi membran, serta keterkaitan antara mekanisme transport pasif dan aktif (Mishra, 2024). Dengan demikian, difusi pada membran sel merupakan proses multifaktorial yang melibatkan interaksi kompleks antara gradien konsentrasi, sifat fisikokimia molekul, dinamika membran, dan peran protein transpor.

Osmosis pada membran sel

Berdasarkan hasil kajian yang dirangkum pada Tabel 2, osmosis pada membran sel tidak dapat dipahami semata-mata sebagai perpindahan air pasif akibat perbedaan konsentrasi solut. Keberadaan aquaporin terbukti menjadi faktor kunci yang mengatur laju dan selektivitas aliran air. Devuyst *et al.* (2024) menegaskan bahwa Aquaporin-1 (AQP1) berperan penting dalam mempercepat fluks air serta memungkinkan sel mempertahankan keseimbangan cairan dan tekanan osmotik dalam berbagai kondisi fisiologis. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa osmosis merupakan proses terkontrol yang melibatkan struktur protein spesifik, bukan sekadar difusi air secara acak.

Tingkat struktural, efisiensi osmosis sangat dipengaruhi oleh karakteristik kanal aquaporin itu sendiri. Vrettou *et al.* (2024) menunjukkan bahwa pergerakan air dalam aquaporin berlangsung secara selektif melalui mekanisme single-file, sehingga hanya molekul air yang dapat melintas, sementara ion dan zat terlarut lainnya terhambat. Selain itu, Fuwad *et al.* (2024) melaporkan bahwa interaksi antara aquaporin dan lingkungan lipid membran turut memengaruhi perubahan konformasi protein, yang pada akhirnya menentukan kecepatan aliran air. Temuan ini menegaskan bahwa osmosis merupakan hasil interaksi dinamis antara protein kanal dan struktur membran.

Selain dalam sistem biologis, pemahaman mengenai osmosis juga berkembang melalui kajian pada membran buatan. Mohammadifakhr *et al.* (2020) menjelaskan bahwa pada teknologi forward osmosis, fluks air ditentukan oleh kombinasi gradien osmotik dan sifat fisik membran, seperti ukuran pori dan permeabilitas. Kajian lain menunjukkan bahwa dinamika lipid, perubahan polaritas membran, serta keberadaan spesies reaktif dapat memodulasi laju perpindahan air (Möller *et al.*, 2019). Sejalan dengan itu, Feng *et al.* (2025) menegaskan bahwa interaksi molekul air dengan lingkungan lipid dan karakteristik struktural molekul berkontribusi terhadap variasi permeabilitas membran. Dengan demikian, osmosis pada membran sel merupakan proses kompleks yang dipengaruhi oleh gradien osmotik, struktur protein kanal, serta dinamika fisikokimia membran.

Transpor Aktif pada Membran Sel

Berdasarkan hasil kajian yang dirangkum pada Tabel 3, transpor aktif pada membran sel tidak dapat dipahami hanya sebagai perpindahan ion dengan konsumsi energi, melainkan sebagai sistem terintegrasi yang berperan dalam regulasi fisiologis sel secara menyeluruh. Salah satu contoh paling fundamental adalah Na^+/K^+ -ATPase, yang memindahkan tiga ion natrium keluar sel dan dua ion kalium ke dalam sel setiap siklus hidrolisis ATP. Contreras *et al.* (2024) menunjukkan bahwa pompa ini tidak hanya berfungsi mempertahankan gradien elektrokimia, tetapi juga terlibat dalam pengaturan sinyal intraseluler dan homeostasis sel melalui interaksi dengan protein membran lainnya. Temuan

ini menegaskan bahwa pompa ion primer memiliki peran yang melampaui fungsi transport semata.

Selain pompa primer, hasil kajian juga menunjukkan bahwa transpor aktif sekunder memegang peranan penting dalam pemindahan molekul yang memanfaatkan energi dari gradien ion lain. Transporter jenis symporter dan antiporter bekerja melalui perubahan konformasi protein yang besar dan terkoordinasi, memungkinkan pemindahan zat secara selektif dan efisien. Qiu *et al.* (2023) melaporkan bahwa transporter glutamat manusia (EAAT) memanfaatkan gradien natrium dan proton untuk memindahkan glutamat melawan gradien konsentrasi. Mekanisme ini sangat penting dalam pemrosesan sinyal saraf dan pembersihan neurotransmitter dari celah sinaptik, sehingga mendukung fungsi sistem saraf yang optimal.

Peran transpor aktif juga tampak jelas pada keluarga ATP-binding cassette (ABC) transporter, yang berfungsi memindahkan molekul berukuran besar seperti lipid, metabolit, dan obat-obatan. How *et al.* (2024) menunjukkan bahwa ABC transporter memiliki domain pengikat nukleotida dan domain transmembran yang bekerja secara sinkron untuk menghasilkan perubahan konformasi yang mendorong perpindahan substrat. Keberadaan transporter ini sangat relevan dalam konteks resistensi obat pada sel kanker, yang menegaskan pentingnya transpor aktif dalam bidang kesehatan dan terapi medis.

Jenis pompa aktif lainnya yang memiliki peran sentral adalah V-ATPase, yang berfungsi mempertahankan keasaman organel intraseluler seperti lisosom dan endosom. Eaton *et al.* (2021) menunjukkan bahwa V-ATPase tidak hanya berperan sebagai pompa proton, tetapi juga sebagai elemen sinyal dalam proses proliferasi dan respons terhadap stres seluler. Pada organisme lain, seperti fungi, pompa H⁺ tipe P pada membran plasma berperan dalam pembentukan gradien proton yang mendukung transpor sekunder dan penyerapan nutrisi (Zhao *et al.*, 2024). Hal ini menunjukkan adanya variasi evolusioner dalam mekanisme transpor aktif sesuai kebutuhan fisiologis organisme.

Lebih lanjut, hasil kajian molekuler menunjukkan bahwa efektivitas transpor aktif sangat dipengaruhi oleh sifat struktural dan kimia substrat yang ditranspor. Feng *et al.* (2025) melaporkan bahwa orientasi molekul, polaritas, serta interaksi hidrofobik dengan domain

transmembran transporter menentukan keberhasilan pengikatan dan pemindahan substrat. Temuan ini memperkuat bahwa transpor aktif merupakan proses yang sangat spesifik dan terarah, yang bergantung pada integrasi energi kimia ATP, gradien ion, dan struktur molekuler protein transpor.

Berdasarkan sintesis hasil kajian pustaka pada mekanisme difusi, osmosis, dan transpor aktif, artikel ini menunjukkan bahwa transport membran sel tidak dapat dipahami sebagai proses yang berdiri sendiri, melainkan sebagai sistem terintegrasi yang dipengaruhi oleh interaksi antara sifat fisikokimia molekul, struktur protein transpor, serta dinamika lipid membran. Berbeda dengan kajian sebelumnya yang umumnya membahas setiap mekanisme secara terpisah, artikel ini menyajikan integrasi konseptual antar mekanisme transport pasif dan aktif dalam satu kerangka pembahasan, sehingga memberikan perspektif komprehensif mengenai regulasi transport membran pada tingkat molekuler.

Kesimpulan

Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa mekanisme transportasi zat melintasi membran sel merupakan proses kompleks yang sangat penting bagi kelangsungan hidup dan fungsi sel. Difusi memungkinkan molekul bergerak mengikuti gradien konsentrasi, baik secara sederhana maupun melalui difusi terfasilitasi dengan bantuan protein pembawa, sehingga molekul polar dan ion dapat masuk atau keluar sel secara efisien. Osmosis mengatur perpindahan air melalui membran semipermeabel, baik secara pasif maupun melalui kanal aquaporin, sehingga berperan penting dalam menjaga keseimbangan cairan, tekanan osmotik, serta respons sel terhadap perubahan lingkungan. Transpor aktif memungkinkan pemindahan molekul dan ion melawan gradien konsentrasi dengan menggunakan energi ATP, melalui pompa primer, transporter sekunder, dan ABC transporter, yang berperan dalam mempertahankan gradien elektrokimia, regulasi sinyal seluler, dan fungsi fisiologis esensial. Seluruh mekanisme ini dipengaruhi oleh sifat kimia dan fisik membran, interaksi molekul dengan protein transpor, serta karakteristik struktural molekul yang melintasinya,

menjadikan membran sel sebagai sistem dinamis yang selektif dan terkontrol. Sintesis temuan mutakhir dalam kajian ini menegaskan bahwa pemahaman transport membran perlu dipandang secara integratif, dengan mempertimbangkan keterkaitan antara mekanisme pasif dan aktif serta dinamika struktur membran dalam konteks fisiologi sel. Dengan demikian, difusi, osmosis, dan transpor aktif saling terintegrasi untuk memastikan sel mempertahankan keseimbangan internal, menjalankan proses metabolik, dan merespons perubahan lingkungan secara optimal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Biologi, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Flores, atas segala dukungan akademik yang diberikan selama penyusunan artikel ini. Apresiasi juga ditujukan kepada para dosen pengampu mata kuliah Biologi Sel atas arahan dan bimbingan ilmiah yang membantu dalam proses kajian literatur. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam pengumpulan referensi dan penyediaan akses ke pangkalan data ilmiah. Meskipun penelitian ini tidak memperoleh dana khusus dari lembaga manapun, seluruh proses penyusunan artikel dapat terlaksana berkat fasilitas pendukung yang tersedia di institusi penulis.

Referensi

- Asbar, R. F., & Witarsa, R. (2020). Kajian literatur tentang penerapan pembelajaran terpadu di sekolah dasar. *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran*, 3(2), 225–234.
<https://doi.org/10.31004/jrpp.v3i2.1220>
- Bernardi, A., Bennett, W. F. D., He, S., Jones, D., Kirshner, D., Bennion, B. J., & Carpenter, T. S. (2023). Advances in computational approaches for estimating passive permeability in drug discovery. *Membranes*, 13(11), 851.
<https://doi.org/10.3390/membranes13110851>
- Carbó, R., & Rodríguez, E. (2023). Relevance of sugar transport across the cell membrane. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(7), 6085.
<https://doi.org/10.3390/ijms24076085>
- Ciarimboli, G. (2024). Overcoming biological barriers: Importance of membrane transporters in homeostasis, disease, and disease treatment 2.0. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(10), 5521.
<https://doi.org/10.3390/ijms25105521>
- Contreras, R. G., Torres-Carrillo, A., Flores-Maldonado, C., Shoshani, L., & Ponce, A. (2024). Na⁺/K⁺-ATPase: More than an electrogenic pump. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11), 6122.
<https://doi.org/10.3390/ijms25116122>
- Devuyst, O. (2024). Aquaporin-1 and osmosis: From physiology to precision in peritoneal dialysis. *Journal of the American Society of Nephrology*.
<https://doi.org/10.1681/ASN.0000000000000496>
- Eaton, A. F., Merkulova, M., & Brown, D. (2021). The H⁺-ATPase (V-ATPase): From proton pump to signaling complex in health and disease.
<https://doi.org/10.1152/ajpcell.00442.2020>
- Feng, Q., De Chavez, D., Kihlberg, J., & Poongavanam, V. (2025). A membrane permeability database for nonpeptidic macrocycles. *Scientific Data*.
<https://doi.org/10.1038/s41597-024-04302-z>
- Frallicciardi, J., [initials]. (2022). Membrane thickness, lipid phase and sterol type are determining factors for passive diffusion through lipid bilayers. *Nature Communications*.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29272-x>
- Fuwad, A. et al. (2024). Highly permeable and shelf-stable aquaporin biomimetic membrane based on an anodic aluminum oxide substrate. *Npj Clean Water*.
<https://doi.org/10.1038/s41545-024-00301-0>
- Hong, C. (2024). Membrane permeability: Mechanisms, factors, and applications in

- biological and industrial systems. <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/membrane-permeability-mechanisms-factors-and-applications-in-biological-and-industrial-systems.pdf>
- How, S. S., et al. (2024). ATP-binding cassette (ABC) transporters: Structures and mechanisms. <https://doi.org/10.1631/jzus.B2300641>
- Lestari, A., & Susantini, E. (2020). Pengembangan instrumen tes miskonsepsi materi transpor membran sel. *BioEdu*, 9(3), 381–388. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/bioedu/article/download/36763/32594>
- Lestari, D. D. (2025). Peran protein transpor dalam menjaga homeostasis sel. *Spizaetus: Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi*, 5(1), 1–7. <https://dx.doi.org/10.55241/spibio.v6i1.529>
- Mishra, A. (2024). Mechanisms of active and passive membrane transport in cells. *Biochemistry & Physiology*, 13(499). <https://doi.org/10.4172/2168-9652.1000499>
- Mohammadifakhr, M., de Grooth, J., Roesink, H. D. W., & Kemperman, A. J. B. (2020). Forward osmosis: A critical review. *Processes*, 8(4), 404. <https://doi.org/10.3390/pr8040404>
- Möller, M., et al. (2019). Diffusion and transport of reactive species across cell membranes. Springer Protocols. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11488-6_1
- Qiu, B., et al. (2023). Symport and antiport mechanisms of human glutamate transporters. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38120-5>
- Ruffinatti, F. A., Scarpellino, G., Chinigò, G., Visentin, L., & Munaron, L. (2023). The emerging concept of transportome: State of the art. *Physiology*, 38(6), 285–302. <https://doi.org/10.1152/physiol.00010.2023>
- Sauve, S., Williamson, J., Polasa, A., & Moradi, M. (2023). Ins and Outs of Rocker Switch Mechanism in Major Facilitator Superfamily of Transporters. *Membranes*, 13(5), 462. <https://doi.org/10.3390/membranes13050462>
- Tomkins, M., Hughes, A., & Morris, R. J. (2021). An update on passive transport in and out of plant cells. *Plant Physiology*, 187(4), 1973–1984. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab406>
- Vrettou, C. S., et al. (2024). Exploring aquaporins in human studies: mechanisms and pathophysiology. *Life*, 14(12), 1688. <https://doi.org/10.3390/life14121688>
- Yuliani, D. S., Retnoningsih, I., & Irsadi. (2021). Pengaruh perpaduan media statis dan dinamis terhadap pemahaman konsep transpor membran sel. *Prosiding Seminar Nasional Biodiversitas (ProsBi)*. <https://jurnal.uns.ac.id/prosbi/article/view/69304>
- Zhao, C.-R., You, Z.-L., & Bai, L. (2024). Fungal plasma membrane H⁺-ATPase: Structure, mechanism, and drug discovery. *Journal of Fungi*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/jof10040273>