

Diversitas Adaptasi Pergerakan pada Kingdom Animalia: Analisis Kompleksitas Sistem Motorik dari Hewan Sederhana hingga Kompleks

Diversity of Movement Adaptations in the Animal Kingdom: Analyzing the Complexity of Motor Systems from Simple to Complex Organisms

Alif Prasetyo Wibowo¹, Agnes Monika Simamora², Enjel Febriani Manalu³, Fatiha Salsabila Lubis⁴, Julika Indriani Manik⁵, Nindya Viga Erika⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} State university of Medan, Faculty of Mathematics and Natural Sciences

Article Info:

Received: 19 – 12 – 2024
in revised form: 21 – 12 – 2024

Accepted: 31 – 12 – 2024
Available Online: 25 – 04 – 2025

Keywords:

Animal movement, Behavioral ecology, Ecosystem, Motor adaptation

Corresponding Author:

State university of Medan,
Faculty of Mathematics and
Natural Sciences, medan,
sumatera utara, indonesia
phone: (+628) 9607828326
e-mail: alifxw124@gmail.com

Abstract: *This study explores the diversity of movement adaptations within the Animal Kingdom, from simple to complex organisms, with a focus on the motor system's complexity in response to environmental changes. Understanding this diversity is crucial due to its significant impact on global ecosystems, particularly regarding urbanization, deforestation, and climate change. Some species exhibit unique movement patterns, like large-scale migrations, that play a vital role in ecosystem stability. This research uses literature synthesis and descriptive qualitative analysis, revealing movement strategies influenced by ecological and behavioral factors. The study highlights the importance of protecting migration routes for biodiversity conservation efforts.*

Abstrak: *Penelitian ini membahas keanekaragaman adaptasi pergerakan pada Kingdom Animalia, mulai dari hewan sederhana hingga kompleks, dengan fokus pada kompleksitas sistem motorik yang berkembang seiring perubahan lingkungan. Keanekaragaman adaptasi pergerakan ini penting dipahami karena memiliki dampak besar terhadap ekosistem global, terutama terkait urbanisasi, deforestasi, dan perubahan iklim. Beberapa spesies menunjukkan pola pergerakan unik, seperti migrasi besar-besaran, yang penting dalam menjaga stabilitas ekosistem. Studi ini menggunakan sintesis literatur dan analisis deskriptif kualitatif, dengan hasil yang menunjukkan variasi strategi pergerakan berdasarkan faktor ekologi dan perilaku. Penelitian ini menekan pentingnya perlindungan jalur migrasi untuk upaya konservasi keanekaragaman hayati.*

PENDAHULUAN

Pergerakan merupakan salah satu ciri paling mendasar yang membedakan Kingdom Animalia dari makhluk hidup lainnya, dan kemampuan ini telah berevolusi secara beragam, tergantung pada tantangan ekologis serta kondisi lingkungan yang dihadapi oleh masing-masing spesies. Keanekaragaman adaptasi pergerakan ini sangat dipengaruhi oleh perubahan lingkungan yang terjadi akibat aktivitas manusia, di mana ancaman tersebut berimplikasi pada ekosistem global secara keseluruhan. Memahami kompleksitas sistem motorik dari hewan sederhana hingga hewan yang lebih kompleks menjadi penting untuk mengungkapkan bagaimana strategi pergerakan ini dipertahankan, dikembangkan, atau bahkan terancam punah. Perubahan lingkungan yang dipicu oleh aktivitas manusia, seperti urbanisasi, deforestasi, dan perubahan iklim global, telah menyebabkan modifikasi habitat yang drastis, berdampak besar pada adaptasi pergerakan berbagai spesies hewan.

Mendokumentasikan dampak perubahan ini pada migrasi wildebeest di Sungai Mara, di mana pola migrasi tradisional yang selama jutaan tahun mendukung siklus nutrisi ekosistem mulai terganggu (Subalusky et al., 2017). Modifikasi habitat menghambat akses ke sumber daya penting, sementara perubahan iklim memengaruhi pola pergerakan yang vital untuk kelangsungan spesies. Riotte-Lambert dan Matthiopoulos (2018) menambahkan bahwa gangguan terhadap informasi publik tentang sumber daya, seperti ketersediaan makanan dan air, dapat merusak efisiensi pergerakan kelompok dan menyebabkan disrupsi besar dalam strategi pencarian makanan yang telah berevolusi.

Meskipun hewan sederhana seperti invertebrata memiliki sistem motorik yang tampak primitif, penelitian menunjukkan bahwa kompleksitas sistem ini lebih besar daripada yang diduga sebelumnya. Shaw (2020) menemukan bahwa individu dalam populasi hewan sederhana menampilkan variasi gerakan berdasarkan karakteristik kepribadian, yang menunjukkan tingkat kompleksitas tinggi dalam pengendalian motorik. Namun, mekanisme neural yang mendasari pergerakan ini, seperti interaksi antara sistem saraf dan otot-otot sederhana, masih kurang dipahami. Kompleksitas ini melibatkan strategi perilaku dan respons motorik yang dipengaruhi oleh stimulus lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami bagaimana pergerakan dasar ini berevolusi dan bagaimana variasi ini berkontribusi pada keberhasilan bertahan hidup spesies.

Adaptasi pergerakan pada spesies invasif menyoroti kemampuan luar biasa mereka untuk beradaptasi dan mendominasi habitat baru, sering kali merugikan spesies asli. Abrahms et al. (2017) mengklasifikasikan pergerakan hewan ke dalam sindrom seperti migrasi, nomadisme, dan territorialitas, yang memberikan keunggulan bagi spesies invasif. Adaptasi ini meningkatkan efisiensi dalam pencarian sumber daya dan persaingan, menyebabkan ketidakseimbangan ekosistem lokal. Melalui model epidemiologi SIR, Lisovski et al. (2018) menunjukkan bagaimana pola pergerakan yang berbeda memengaruhi penyebaran penyakit, yang selanjutnya mempercepat invasi spesies dan merusak ekosistem. Memahami adaptasi motorik ini sangat penting untuk pengelolaan dan pencegahan dampak ekologis negatif dari spesies invasif.

Spesies dengan adaptasi motorik yang unik, seperti migrasi besar-besaran atau dispersal jarak jauh, memainkan peran kunci dalam menjaga stabilitas ekosistem. Studi oleh Subalusky et al. (2017) menekankan bahwa hilangnya spesies dengan pergerakan yang unik dapat mengganggu fungsi ekosistem, seperti distribusi nutrisi dan interaksi komunitas. Perlindungan koridor migrasi dan habitat kunci menjadi krusial dalam upaya konservasi. Selain itu, Abrahms et al. (2017) menunjukkan bahwa memahami sindrom pergerakan dan faktor-faktor yang memengaruhi adaptasi motorik dapat membantu dalam mengembangkan strategi konservasi yang efektif. Hilangnya spesies dengan strategi pergerakan yang telah berevolusi selama jutaan tahun tidak hanya mengurangi keanekaragaman hayati, tetapi juga melemahkan kapasitas ekosistem untuk beradaptasi terhadap perubahan lingkungan di masa depan.

Dengan pendekatan ini, analisis sistematis dari diversitas adaptasi pergerakan dalam Kingdom Animalia, mulai dari hewan sederhana hingga kompleks, mengungkapkan betapa eratnya keterkaitan antara ekologi, evolusi, dan mekanisme motorik yang memengaruhi keberlanjutan kehidupan di Bumi. Memahami kompleksitas ini memberikan landasan ilmiah untuk upaya konservasi dan pengelolaan ekosistem di masa depan. mekanisme motorik yang memengaruhi keberlanjutan kehidupan di Bumi.

METODE

Studi ini mengadopsi metode penelitian berbasis sintesis literatur dan analisis deskriptif kualitatif untuk mempelajari diversitas adaptasi pergerakan pada hewan, khususnya spesies vertebrata. Pendekatan ini bertujuan untuk mengintegrasikan hasil penelitian yang sudah ada, mengidentifikasi pola-pola pergerakan umum, serta menganalisis keterkaitan antara strategi pergerakan dengan faktor ekologis dan perilaku. Untuk mendukung kajian yang mendalam dan komprehensif, penelitian ini mengacu pada berbagai publikasi ilmiah yang relevan, termasuk studi-studi utama yang telah dipaparkan dalam pendahuluan, seperti penelitian Subalusky et al. (2017) dan Riotte-Lambert & Matthiopoulos (2018).

Metode Pengumpulan Data

Proses pengumpulan data dimulai dengan pencarian sistematis dari literatur ilmiah yang mencakup jurnal-jurnal yang dipublikasikan dalam basis data seperti *Web of Science*, *Scopus*, dan *PubMed*. Fokus utama adalah pada penelitian yang mempelajari variasi gerakan hewan dalam konteks ekologi perilaku dan dinamika ekosistem. Publikasi dari berbagai disiplin ilmu digunakan, termasuk ekologi, biologi perilaku, dan ilmu lingkungan, untuk mendapatkan perspektif holistik tentang adaptasi pergerakan. Artikel yang dipilih diutamakan memiliki kontribusi signifikan terhadap pemahaman tentang sindrom pergerakan, faktor yang memengaruhi pergerakan, serta dampak ekologis dari perubahan pola gerakan.

Metode sintesis literatur yang digunakan adalah pendekatan kualitatif deskriptif, di mana studi-studi yang relevan dikumpulkan, dianalisis, dan dirangkum untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang adaptasi motorik hewan. Pendekatan ini memungkinkan penguraian data yang kompleks ke dalam komponen-komponen yang dapat dianalisis, mengidentifikasi pola umum dan karakteristik unik dari berbagai spesies. Dengan mengacu pada kerangka ekologi perilaku, data dari setiap penelitian diklasifikasikan berdasarkan faktor-faktor ekologis yang memengaruhi variasi gerakan, seperti perubahan lingkungan, interaksi antarspesies, dan adaptasi terhadap tekanan ekosistem.

Untuk memahami pola pergerakan antarspesies, studi ini mengadopsi konsep sindrom pergerakan, sebagaimana dijelaskan oleh Abrahms et al. (2017) dan Riotte-Lambert & Matthiopoulos (2018). Sindrom pergerakan adalah pendekatan yang mengklasifikasikan strategi pergerakan berdasarkan parameter-parameter seperti migrasi, nomadisme, dan territorialitas. Studi ini mengeksplorasi bagaimana karakteristik sindrom ini bervariasi antara spesies, serta bagaimana pola-pola tersebut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan. Analisis data mengaitkan sindrom pergerakan dengan faktor-faktor yang timbul.

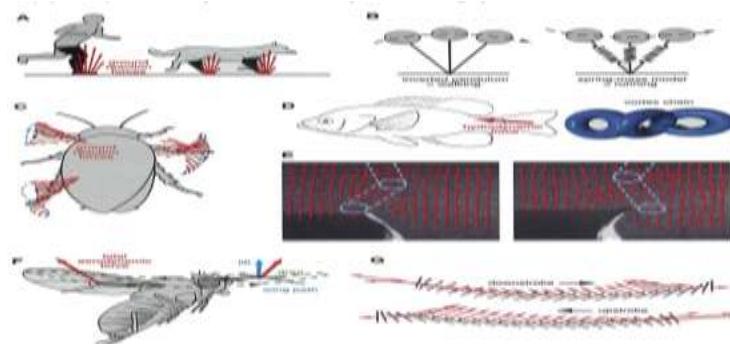
Metode Analisis Data

Pendekatan analisis yang diterapkan dalam penelitian ini mencakup *Principal Component Analysis* (PCA) dan analisis klaster. PCA digunakan untuk mengurangi dimensi data yang kompleks, mengidentifikasi variabel-variabel utama yang paling berkontribusi terhadap variasi pergerakan. Misalnya, penelitian Riotte-Lambert & Matthiopoulos (2018) tentang gangguan informasi publik digunakan untuk menentukan bagaimana faktor-faktor ini memengaruhi efisiensi dan koordinasi pergerakan hewan dalam kelompok. Analisis klaster digunakan untuk mengelompokkan spesies berdasarkan kesamaan pola pergerakan, yang memungkinkan identifikasi sindrom pergerakan umum dan unik yang dimiliki spesies tertentu.

Setelah pola-pola gerakan diidentifikasi, temuan dikaitkan kembali dengan konteks ekologis dan perilaku untuk memahami bagaimana strategi pergerakan ini berevolusi dan dipertahankan. Misalnya, hasil studi Subalusky et al. (2017) tentang migrasi wildebeest digunakan untuk mengilustrasikan hubungan antara strategi pergerakan migrasi dan fungsi ekosistem. Selanjutnya, dampak dari adaptasi motorik spesies invasif, seperti yang diuraikan oleh Lisovski et al. (2018), diintegrasikan ke dalam analisis untuk menjelaskan konsekuensi ekologis yang lebih luas.

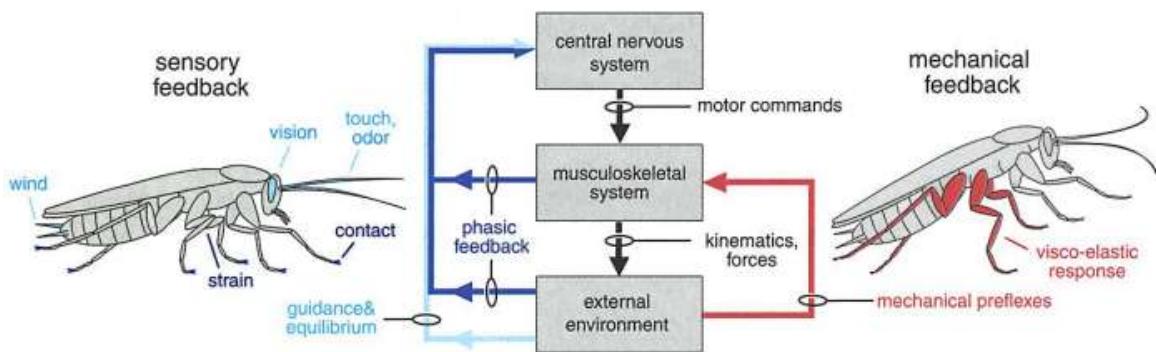
Terakhir, hasil sintesis dan analisis ini digunakan untuk menyusun rekomendasi konservasi yang relevan, menekankan pentingnya melindungi jalur migrasi dan habitat kritis. Dengan memahami sindrom pergerakan dan pola adaptasi motorik, strategi konservasi dapat dioptimalkan untuk melindungi keanekaragaman gerakan yang esensial bagi keseimbangan ekosistem, sebagaimana dijelaskan oleh Abrahms et al. (2017) dan penelitian terkait lainnya. Melalui pendekatan ini, penelitian tidak hanya menggambarkan keanekaragaman adaptasi pergerakan pada hewan tetapi juga menghubungkan temuan tersebut dengan tantangan ekologi modern dan implikasi konservasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN



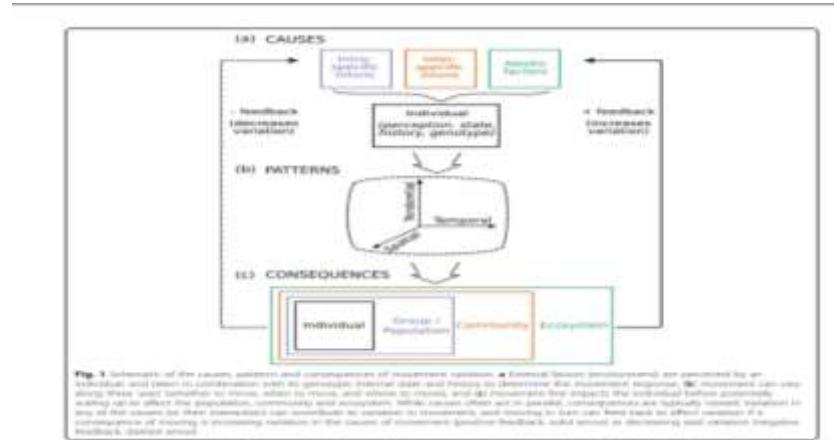
Dickinson et al., (2020)

Gambar A menunjukkan vektor gaya reaksi tanah (ground reaction force) yang diterapkan oleh hewan berkaki saat berlari, seperti manusia dan anjing. Vektor gaya ini berubah sepanjang fase pijakan kaki, dimulai dengan fase penggereman dan diikuti oleh fase pendorongan. Vektor gaya tersebut mengarahkan ke sendi utama untuk mengurangi torsi. **Gambar B** menggambarkan dua model dasar pergerakan berkaki: berjalan dan berlari. Model berjalan menyerupai gerakan bandul terbalik, di mana pusat massa tubuh bergerak melengkung di atas kaki yang kaku. Model berlari, di sisi lain, menyerupai sistem pegas-massa, di mana energi kinetik dan potensial disimpan dan dilepaskan sebagai energi elastis. **Gambar C**: Menjelaskan gaya reaksi tanah pada kecoa saat berlari. Gaya yang diterapkan oleh kaki belakang, tengah, dan depan bervariasi dalam arah dan tujuan, di mana gaya horizontal ke arah tengah membantu menstabilkan tubuh, dan kaki menyesuaikan gaya untuk menyeimbangkan pergerakan. **Gambar D** merekonstruksi pola vorteks yang dihasilkan di belakang ikan saat berenang. Setiap sapuan sirip menciptakan vorteks berbentuk donat yang mewakili momentum yang dipindahkan ke air, yang kemudian memengaruhi gaya hidrodinamis yang dihasilkan. **Gambar E** menggunakan data *Digital Particle Image Velocimetry* untuk memvisualisasikan kecepatan air di sekitar ekor ikan saat berenang, mengilustrasikan perubahan aliran yang dihasilkan oleh gerakan ekor. **Gambar F** menunjukkan gaya aerodinamis yang dihasilkan oleh sayap lalat buah selama penerbangan mengambang. Gaya angkat dan seret diuraikan dari gaya total yang dihasilkan oleh sayap, menunjukkan bagaimana rotasi sayap mengubah orientasi gaya. **Gambar G** adalah diagram gerakan sayap lalat buah yang menunjukkan besarnya dan arah gaya aerodinamis sepanjang sapuan sayap. Ini menunjukkan perubahan posisi dan gaya selama gerakan sayap ke atas dan ke bawah.



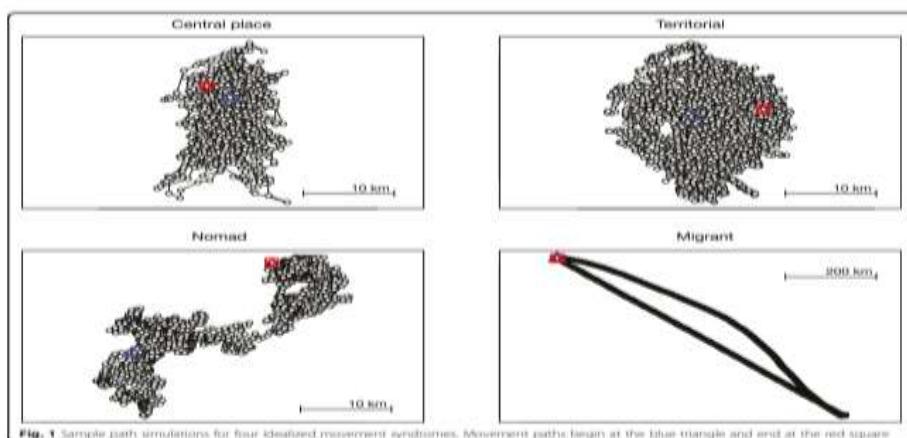
Pada Model Dickinson et al., (2020) umpan balik untuk kontrol lokomotor pada hewan, yang menggabungkan umpan balik neural dan mekanik: **Diagram tersebut** menunjukkan bagaimana sistem saraf pusat menghasilkan perintah motorik yang menggerakkan sistem

muskuloskeletal, yang kemudian berinteraksi dengan lingkungan eksternal. Lingkungan ini memberikan umpan balik sensorik ke sistem saraf pusat, yang mengoreksi dan menyempurnakan perintah motorik. Tiga bentuk umpan balik sensorik dijelaskan: panduan arah dan keseimbangan dari organ sensorik, seperti mata dan telinga; organ ekuilibrium seperti halter; dan umpan balik mekanosensor yang cepat yang menyesuaikan pola motorik pada setiap siklus pergerakan.



Dalam studi Shaw. (2020) ini memberikan skema visual yang sistematis tentang bagaimana variasi pergerakan hewan dipengaruhi oleh berbagai penyebab, bagaimana pola variasi tersebut dapat terbentuk, serta apa saja konsekuensi ekologisnya. Skema ini terdiri dari tiga bagian utama, yang menunjukkan hubungan kompleks antara faktor-faktor eksternal, respons individu, dan dampak yang lebih luas pada ekosistem.

Bagian pertama dari skema mengilustrasikan bahwa penyebab utama dari variasi pergerakan hewan berasal dari faktor-faktor eksternal, termasuk kondisi lingkungan, interaksi intra- dan interspesifik, serta tekanan ekologi yang beragam. Faktor-faktor ini memengaruhi individu dengan cara yang kompleks: setiap individu memproses informasi dari lingkungannya berdasarkan genotipe mereka, kondisi fisiologis internal, dan sejarah hidup sebelumnya. Contohnya, hewan dengan genotipe tertentu mungkin lebih cenderung bergerak untuk mencari sumber daya saat menghadapi kondisi lingkungan yang buruk, sementara yang lain tetap tinggal. Interaksi antara faktor-faktor ini menciptakan keragaman dalam respons motorik, yang menjadi dasar variasi pergerakan pada spesies hewan



Skema kemudian melanjutkan dengan menjelaskan bagaimana variasi pergerakan dapat dikategorikan ke dalam tiga sumbu utama: *tendential*, *temporal*, dan *spatial*.

Tendential (Apakah akan bergerak atau tidak): Sumbu ini menggambarkan kecenderungan individu untuk bergerak, yang dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti sumber daya yang

tersedia atau ancaman dari pemangsa. Sebagai contoh, dalam populasi yang memiliki strategi pergerakan parsial, hanya sebagian individu yang bermigrasi, sementara yang lain tidak.

Temporal (Kapan bergerak dan seberapa sering): Sumbu ini berfokus pada frekuensi dan waktu pergerakan. Beberapa individu mungkin menunjukkan preferensi temporal tertentu, seperti bermigrasi pada musim yang sama setiap tahun, atau memilih waktu yang optimal untuk menghindari predasi.

Spatial (Dimana akan bergerak dan berapa jauh): Aspek ini menjelaskan variasi dalam jarak dan arah pergerakan. Misalnya, beberapa spesies menampilkan perbedaan dalam rute migrasi atau pola pergerakan harian mereka, yang dapat dipengaruhi oleh kondisi habitat atau kebutuhan sumber daya. Beberapa hewan dapat menempuh jarak jauh untuk mencari makanan, sementara yang lain mungkin tetap berada dalam wilayah yang lebih terbatas.

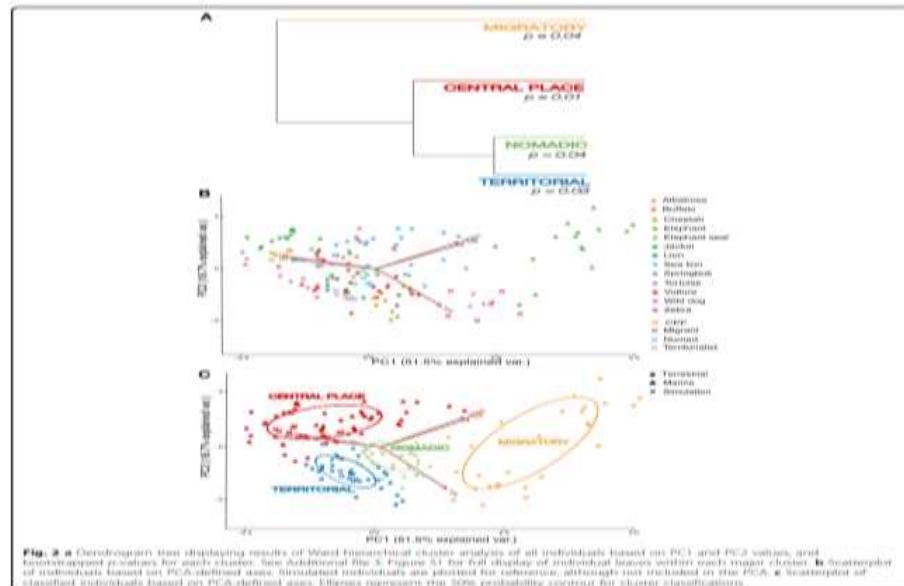
Ketiga sumbu ini menunjukkan bahwa variasi dalam pergerakan dapat sangat bervariasi antar individu dalam satu spesies, membentuk sindrom pergerakan yang beragam, yang penting untuk memahami bagaimana spesies menavigasi dan beradaptasi terhadap lingkungan yang berubah. Bagian terakhir dari skema menggarisbawahi bahwa variasi pergerakan individu tidak hanya berdampak pada individu itu sendiri tetapi juga memiliki implikasi yang lebih luas pada tingkat populasi, komunitas, dan ekosistem. Pergerakan individu dapat memengaruhi distribusi dan struktur populasi, mengubah interaksi antarspesies, dan memengaruhi aliran nutrisi serta patogen di seluruh ekosistem.

Pada tingkat populasi, perbedaan dalam strategi pergerakan dapat memengaruhi koneksi populasi dan dinamika genetik. Sebagai contoh, variasi dalam jarak dispersal individu dapat menentukan apakah populasi tetap terhubung atau terfragmentasi.

Pada tingkat komunitas, variasi dalam pergerakan dapat memengaruhi kompetisi antarspesies dan mutualisme. Sebagai contoh, perbedaan dalam pola foraging dapat memengaruhi interaksi dengan spesies lain yang mengandalkan sumber daya yang sama.

Pada tingkat ekosistem, pergerakan hewan dapat memengaruhi siklus nutrisi. Misalnya, hewan yang bermigrasi membawa nutrisi dari satu ekosistem ke ekosistem lain, memengaruhi kesuburan tanah atau pola penyebaran tumbuhan.

Pada simulasi jalur pergerakan yang dilakukan oleh Abrahms et al. (2017) menyajikan simulasi jalur pergerakan untuk empat sindrom pergerakan yang diidealkan: *central place foraging*, teritorial, nomadik, dan migrasi. Simulasi ini menunjukkan pola pergerakan khas untuk masing-masing sindrom, mulai dari pergerakan berpusat ke satu titik hingga perpindahan jarak jauh yang terarah. Jalur pergerakan ini memberikan visualisasi yang jelas tentang bagaimana perbedaan strategi gerakan dapat dimodelkan.



Pada menampilkan analisis kluster yang dihasilkan dari data pergerakan hewan. Dendrogram di Panel (a) mengelompokkan individu ke dalam empat kluster utama, menunjukkan pola pergerakan yang signifikan secara statistik. Scatterplot di Panel (b) dan (c) memvisualisasikan

individu berdasarkan nilai-nilai PCA, mengonfirmasi bahwa sindrom pergerakan dapat dipisahkan dengan baik di ruang ekologi gerakan. Kluster yang dihasilkan menunjukkan bahwa meskipun beberapa spesies dapat berbagi sindrom pergerakan, ada variasi intraspesifik yang penting, mencerminkan keanekaragaman strategi adaptasi motorik dalam ekologi pergerakan. Penjelasan ini memberikan pemahaman sistematis tentang bagaimana data pergerakan hewan dapat diklasifikasikan dan dianalisis untuk mengidentifikasi sindrom pergerakan, serta pentingnya pola-pola ini dalam konteks ekologi yang lebih luas.

Secara keseluruhan hasil penelitian Abrahms et al. (2017) menunjukkan bahwa pola pergerakan individu dapat dikelompokkan ke dalam sindrom pergerakan yang berbeda, dengan temuan bahwa dua komponen utama menjelaskan 70% varians dalam metrik pergerakan yang dievaluasi. Ini menunjukkan adanya pola pergerakan yang berulang di berbagai taksa dan lingkungan. Temuan utama pada Shaw. (2020) menunjukkan bahwa variasi gerakan individu dapat dipengaruhi oleh faktor genetik, lingkungan, dan pengalaman sebelumnya. Individu dalam spesies yang sama dapat menunjukkan strategi gerakan yang berbeda, yang dapat mempengaruhi keberhasilan reproduksi dan kelangsungan hidup mereka. Pada penelitian Subalusky et al. (2017) menunjukkan bahwa variasi gerakan individu sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan sosial. Misalnya, dalam konteks migrasi wildebeest, penelitian menunjukkan bahwa meskipun hanya 0,5% dari populasi yang terlibat dalam peristiwa tenggelam, dampak nutrisi dari bangkai mereka terhadap ekosistem sangat signifikan.

Variasi gerakan individu hewan dapat mempengaruhi dinamika populasi dan interaksi ekosistem secara signifikan. Pada Penelitian Bauer & Hoye. (2014) menunjukkan bahwa variasi gerakan di lapangan sering kali lebih kompleks dan dipengaruhi oleh faktor lingkungan dibandingkan dengan pengamatan di laboratorium. Masih terdapat kekurangan pemahaman mengenai dampak migrasi terhadap struktur komunitas dan fungsi ekosistem secara keseluruhan.

DISKUSI

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi signifikan terhadap manajemen dan konservasi, terutama dalam upaya melindungi habitat migrasi dan merespons perubahan lingkungan, perubahan iklim, serta hilangnya habitat. Pola pergerakan dan variasi gerakan hewan memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem, khususnya bagi spesies migran yang sangat dipengaruhi oleh perubahan iklim dan fragmentasi habitat. Memahami pola pergerakan ini dapat membantu perencanaan konservasi mengidentifikasi jalur migrasi kritis dan area yang perlu dilindungi, terutama karena jalur-jalur ini sering kali menjadi penghubung vital antarhabitat.

Dengan memahami respons spesies terhadap perubahan lingkungan melalui pemantauan pergerakan, konservasionis dapat memprediksi bagaimana spesies akan beradaptasi atau berpindah lokasi saat kondisi habitatnya berubah. Informasi ini juga berguna dalam memperkirakan potensi konflik antara aktivitas manusia dan jalur migrasi hewan, yang kemudian dapat diatasi melalui penyesuaian kebijakan konservasi dan perencanaan tata ruang. Selain itu, strategi konservasi yang berbasis pemahaman terhadap variasi gerakan hewan dapat diterapkan untuk mendukung spesies yang terancam punah. Hal ini penting karena spesies tersebut sering kali rentan terhadap ancaman baru, seperti peningkatan suhu, perubahan pola cuaca, dan pergeseran ketersediaan sumber daya akibat iklim yang semakin tidak stabil Rood & Rood. (2020). Secara keseluruhan, integrasi hasil penelitian tentang pola dan variasi pergerakan hewan dalam perencanaan konservasi diharapkan dapat meningkatkan efektivitas dalam melestarikan biodiversitas dan menjaga stabilitas ekosistem. Keterbatasan utama dalam studi ini terletak pada kurangnya data longitudinal yang dapat mengungkap dinamika perubahan pola pergerakan hewan dalam jangka waktu panjang, terutama dalam merespons faktor-faktor lingkungan yang beragam. Data longitudinal sangat penting untuk memahami bagaimana variasi perilaku pergerakan berevolusi seiring perubahan musim, variasi iklim, serta perubahan ketersediaan sumber daya, seperti makanan dan habitat. Selain itu, studi ini terbatas pada spesies tertentu, sehingga generalisasi hasil pada komunitas atau ekosistem yang lebih luas menjadi kurang representatif.

Penelitian di masa depan disarankan untuk mengadopsi pendekatan yang lebih holistik dengan mengintegrasikan teknologi pelacakan real-time, seperti GPS dan telemetri satelit, yang

memungkinkan pengamatan yang lebih rinci dan kontinu terhadap pergerakan hewan dalam habitat aslinya. Teknologi ini akan membantu menangkap pola pergerakan kompleks yang sering kali tidak terlihat dalam kondisi laboratorium yang terkontrol. Di alam liar, perilaku hewan sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor biotik dan abiotik, termasuk tekanan predasi, persaingan antarspesies, fluktuasi ketersediaan makanan, serta perubahan cuaca yang dinamis, yang sulit direplikasi secara akurat dalam pengaturan laboratorium.

Perbandingan antara data lapangan dan data laboratorium sangat krusial untuk memvalidasi asumsi terkait fleksibilitas dan adaptabilitas perilaku pergerakan hewan dalam menghadapi perubahan lingkungan. Data lapangan memungkinkan pengamatan langsung terhadap respon hewan dalam kondisi alami, di mana faktor-faktor kompleks seperti predasi, kompetisi interspesifik, perubahan iklim, dan dinamika sumber daya berinteraksi secara simultan dan sering kali tidak terprediksi. Faktor-faktor ini dapat memengaruhi pola gerakan hewan secara dinamis dan menghasilkan variasi adaptasi motorik yang mungkin tidak muncul dalam kondisi laboratorium yang lebih terkontrol namun terbatas dalam variasi lingkungannya Gilroy et al. (2016). Dengan demikian, observasi lapangan menyediakan kerangka penting untuk menguji apakah perilaku yang terlihat di laboratorium dapat diadaptasi dan direplikasi dalam skenario ekosistem yang lebih heterogeny.

Penelitian di masa mendatang juga disarankan untuk memperluas cakupannya terhadap lebih banyak taksa dan lingkungan yang beragam guna memahami pola pergerakan pada skala ekosistem yang lebih luas. Studi lintas taksa memberikan peluang untuk menggali bagaimana adaptasi motorik berkembang dalam kelompok hewan dengan latar evolusi dan morfologi yang berbeda, misalnya pada mamalia, burung, serangga, dan organisme akuatik. Hal ini memungkinkan identifikasi faktor-faktor spesifik yang mendorong adaptasi pada berbagai kondisi lingkungan, termasuk adaptasi struktural dan fungsional dalam sistem motorik yang mendukung pergerakan di darat, air, maupun udara. Selain itu, studi di berbagai ekosistem seperti terestrial, akuatik, dan zona peralihan (misalnya, estuari dan rawa-rawa) akan memperkaya pemahaman kita mengenai bagaimana perbedaan dalam kondisi fisik habitat—seperti ketersediaan sumber daya, suhu, dan kelembapan—dapat memengaruhi strategi pergerakan dan adaptasi fisiologis yang mendukung mobilitas serta kelangsungan hidup dalam jangka Panjang Miller et al. (2011).

Dengan pendekatan yang lebih luas ini, penelitian lanjutan akan lebih mampu mengidentifikasi pola universal maupun pola spesifik yang berperan dalam variasi gerakan hewan, baik dalam aspek perilaku maupun fisiologi, serta bagaimana faktor-faktor lingkungan internal dan eksternal memengaruhi fleksibilitas adaptasi motorik. Hasil studi ini diharapkan dapat berkontribusi secara signifikan bagi berbagai aspek konservasi, termasuk manajemen spesies yang terancam punah, pengelolaan habitat alami, dan mitigasi, dampak perubahan iklim yang memengaruhi distribusi spesies dan fungsi ekosistem. Misalnya, memahami variasi gerakan di tingkat komunitas sangat penting untuk memprediksi dampak perubahan iklim terhadap stabilitas ekosistem, di mana pergeseran pola migrasi atau pergerakan spesies kunci akibat perubahan suhu global dapat memicu efek berantai yang mengubah struktur dan fungsi ekosistem.

Secara keseluruhan, penelitian yang lebih dalam dalam bidang ini akan memberikan wawasan berharga mengenai hubungan antara adaptasi pergerakan hewan dan dinamika ekosistem, serta membuka peluang bagi pengelolaan sumber daya alam yang lebih berbasis data dan berkelanjutan. Pengetahuan ini juga berpotensi untuk digunakan dalam mengembangkan strategi konservasi yang lebih adaptif dan prediktif, dengan mempertimbangkan skenario lingkungan yang semakin kompleks akibat dampak antropogenik, sehingga memungkinkan pengelolaan yang responsif terhadap tantangan global yang terus berkembang

SIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa adaptasi pergerakan dalam Kingdom Animalia sangat beragam dan penting untuk mempertahankan keseimbangan ekosistem global. Variasi dalam strategi pergerakan hewan ditentukan oleh faktor-faktor ekologis dan perilaku, yang dipengaruhi oleh perubahan lingkungan seperti perubahan iklim dan fragmentasi habitat. Studi ini merekomendasikan perlindungan terhadap jalur migrasi sebagai bagian dari upaya konservasi keanekaragaman hayati. Selain itu, penelitian longitudinal dan pengembangan teknologi pelacakan

real-time penting untuk memantau dinamika pergerakan hewan dalam jangka panjang, yang pada akhirnya dapat mendukung pengelolaan ekosistem yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Abrahms, B., Seidel, D. P., Dougherty, E., Hazen, E. L., Bograd, S. J., Wilson, A. M., ... & Getz, W. M. (2017). Suite of simple metrics reveals common movement syndromes across vertebrate taxa. *Movement ecology*, 5, 1-11.

Bauer, S., & Hoye, B. J. (2014). Migratory animals couple biodiversity and ecosystem functioning worldwide. *Science*, 344(6179), 1242552.

Brown, L. M., & Hall, R. J. (2018). Consequences of resource supplementation for disease risk in a partially migratory population. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1745), 20170095.

Davies, T. W., Duffy, J. P., Bennie, J., & Gaston, K. J. (2014). The nature, extent, and ecological implications of marine light pollution. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12(6), 347-355.

Dickinson, M. H., Farley, C. T., Full, R. J., Koehl, M. A. R., Kram, R., & Lehman, S. (2000). How animals move: an integrative view. *science*, 288(5463), 100-106.

Gilroy, J. J., Gill, J. A., Butchart, S. H., Jones, V. R., & Franco, A. M. (2016). Migratory diversity predicts population declines in birds. *Ecology letters*, 19(3), 308-317.

Lisovski, S., van Dijk, J. G., Klinkenberg, D., Nolet, B. A., Fouchier, R. A., & Klaassen, M. (2018). The roles of migratory and resident birds in local avian influenza infection dynamics. *Journal of Applied Ecology*, 55(6), 2963-2975.

Miller, T. E., Shaw, A. K., Inouye, B. D., & Neubert, M. G. (2011). Sex-biased dispersal and the speed of two-sex invasions. *The American Naturalist*, 177(5), 549-561.

Shaw, A. K. (2020). Causes and consequences of individual variation in animal movement. *Movement ecology*, 8(1), 12.

Subalusky, A. L., Dutton, C. L., Rosi, E. J., & Post, D. M. (2017). Annual mass drownings of the Serengeti wildebeest migration influence nutrient cycling and storage in the Mara River. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(29), 7647-7652.

Snell-Rood, E., & Snell-Rood, C. (2020). The developmental support hypothesis: adaptive plasticity in neural development in response to cues of social support. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1803), 20190491.

Shaw, A. K., Kokko, H., & Neubert, M. G. (2018). Sex difference and Allee effects shape the dynamics of sex-structured invasions. *Journal of Animal Ecology*, 87(1), 36-46.

Riotte-Lambert, L., & Matthiopoulos, J. (2020). Environmental predictability as a cause and consequence of animal movement. *Trends in ecology & evolution*, 35(2), 163-174.

Riotte-Lambert, L., & Matthiopoulos, J. (2019). Communal and efficient movement routines can develop spontaneously through public information use. *Behavioral Ecology*, 30(2), 408-416.

Snell, R. S., Beckman, N. G., Fricke, E., Loiselle, B. A., Carvalho, C. S., Jones, L. R., ... & Schupp, E. W. (2019). Consequences of intraspecific variation in seed dispersal for plant demography, communities, evolution and global change. *AoB Plants*, 11(4), plz016.

Shaw, A. K., Kokko, H., & Neubert, M. G. (2018). Sex difference and Allee effects shape the dynamics of sex-structured invasions. *Journal of Animal Ecology*, 87(1), 36-46.