

PENGEMBANGAN MODEL EKOLOGI KVT v1.0 UNTUK PENILAIAN SPESIES MAMALIA KUNCI PENENTU KEKOKOHAN EKOSISTEM

IDUNG RISDIYANTO



**PROGRAM STUDI KONSERVASI BIODIVERSITAS TROPIKA
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Pengembangan Model Ekologi KVT v1.0 untuk Penilaian Spesies Mamalia Kunci Penentu Kekokohan Ekosistem” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Januari 2025

Idung Risdiyanto
E3601202004



RINGKASAN

IDUNG RISDIYANTO. Pengembangan Model Ekologi KVT v1.0 untuk Penilaian Spesies Mamalia Kunci Penentu Kekokohan Ekosistem. Dibimbing oleh YANTO SANTOSA, NYOTO SANTOSO, dan ARZYANA SUNKAR.

Jaringan interaksi antar spesies seperti predasi, kompetisi, dan simbiosis memainkan peran penting dalam kekokohan suatu ekosistem. Diantara spesies-spesies tersebut, akan terdapat beberapa spesies yang memiliki peran lebih signifikan bagi stabilitas dan keberlanjutan ekosistem dibandingkan spesies lainnya. Jaringan interaksi ini dapat dijelaskan dengan model ekologi. Model dapat menyederhanakan sistem ekologi yang kompleks, sehingga dapat diperoleh pemahaman yang sesuai dengan tujuannya dan dapat memprediksi.

Tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan kerangka kerja pemilihan spesies mamalia kunci bagi kekokohan ekosistem melalui analisis kuantitatif tingkatan tropik dan jejaring makanan. Adapun tujuan-tujuan antara untuk mencapai tujuan utama tersebut adalah 1) mengembangkan model tingkatan tropik yang dapat digunakan untuk menilai peran dan hubungan peubah-peubah karakteristik spesies mamalia yang menentukan kekokohan suatu ekosistem, 2) menyeleksi dan mengformulasikan peubah-peubah karakteristik spesies mamalia sebagai kriteria dan indikator penilaian spesies mamalia kunci dalam suatu ekosistem, dan 3) menentukan spesies kunci dan kekokohan (*robustness*) jejaring makanan pada berbagai tipe ekosistem melalui analisis jejaring dan keluaran model tropik yang dikembangkan dalam penelitian ini

Pengembangan model KVT v1.0 menggunakan landasan teori ekologi yang menekankan pada interaksi antara spesies dan lingkungan, konsep aliran energi dan jejaring makanan. Model menggunakan pendekatan *hybrid* yang menggabungkan metode mekanistik, statistik, pembelajaran mesin dan sistem basisdata. Algoritma model disusun menggunakan diagram *forester* yang diterjemahkan dalam bahasa pemrograman komputer. Basisdata model memuat informasi tentang karakteristik morfologi, fenologi dan fisiologi spesies mamalia yang dihimpun dari berbagai sumber. Masukan model terdiri atas data kehadiran spesies, lokasi *centroid* geografis, luas dan jenis tutupan lahan. Keluaran model terdiri atas kuantifikasi nilai kunci spesies dalam ekosistem, pertumbuhan biomassa ekosistem, dinamika daya dukung dan alokasi biomassa ekosistem untuk spesies mamalia, interaksi pemangsaan, komposisi pakan, dan dinamika populasi spesies. Seluruh keluaran model dalam bentuk numerik.

Validasi model menggunakan dua pendekatan, yaitu (i) kesesuaian dengan teori dan konsep yang dijadikan acuan dalam model ini, dan (ii) membandingkan data keluaran model dengan nilai referensi. Pendekatan pertama dilakukan dengan analisis perubahan ketersediaan energi dan biomassa pada setiap tingkatan tropik mulai dari produser sampai dengan konsumen level ke-n sebagai respon dari perubahan tutupan lahan. Hasilnya menunjukkan kesesuaian dengan teori, salah satunya adalah pertumbuhan biomassa vegetasi mencapai tingkat pertumbuhan klimaks dan stabil setelah tahun tertentu. Validasi nilai keluaran model terhadap nilai referensi menunjukkan bahwa model mampu memprediksi nilai kepadatan populasi untuk sebagian besar spesies di setiap lokasi. Kesalahan relatif kurang dari 60% untuk seluruh kelompok ekosistem dihasilkan dari $69\% \pm 3\%$ data. Nilai RMSE kurang dari $< 2 \text{ ind/km}^2$ dihasilkan dari $45 \pm 3\%$ data dan menjadi $70 \pm 3\%$ data saat $\text{RMSE} < 6 \text{ ind/km}^2$. Nilai MAPE tingkatan model layak digunakan ($\leq 50\%$) diperoleh dari $63 \pm 3\%$ data. Pada tingkatan sangat baik adalah $21 \pm 1\%$ dan baik adalah $41 \pm 3\%$. Validasi

menggunakan NSE menunjukkan 69.2 % dari keseluruhan hasil model memiliki nilai antara 0.8 – 1. Hal ini berarti nilai hasil keluaran model mendekati dan atau sama dengan nilai referensi sehingga layak digunakan.

Hasil keluaran model menunjukkan peubah-peubah karakteristik spesies mamalia memiliki peran signifikan dalam kestabilan aliran energi dalam ekosistem. Pertubasi peubah-peubah seperti berat tubuh, jenis diet, homerange, jumlah anakan, usia minimum melahirkan, *basal metabolisme rate* dan preferensi habitat (arboreal/ground) dapat merubah dinamika ketersediaan dan kebutuhan energi untuk spesies dalam ekosistem per satuan waktu. Saat kebutuhan biomassa melampaui ketersediannya, maka ekosistem akan mengalami tekanan ekologis (*ecological stress/ES*) dan beberapa spesies mengalami penurunan populasi. Pertubasi peubah karakteristik dapat mempercepat/memperlambat waktu kejadian ES dan frekuensi kejadiannya yang disertai dengan perubahan komposisi spesies dan indeks keanekaragaman hayati.

Kriteria dan indikator tersebut dapat disederhanakan dengan mengformulasikan peubah-peubah karakteristik sebagai satu persamaan nilai kunci (Kv) spesies dalam ekosistem. Nilai Kv menunjukkan peran spesies dalam kestabilan dan keberlanjutan ekosistem. Semakin tinggi nilai Kv, maka spesies tersebut memiliki peran paling tinggi atau menjadi kunci bagi kestabilan dan keberlanjutan aliran energi dalam ekosistem. Setiap ekosistem memiliki spesies mamalia kunci yang berbeda berdasarkan pada ketersediaan biomassa dan kehadiran jumlah spesies. Spesies dengan nilai Kv tinggi pada semua ekosistem umumnya didominasi oleh mamalia dari famili *Muridae*, *Sciuridae*, *Tupaiidae*, *Ptilocercidae*, *Hystricidae*, *Viverridae* dan *Herpestidae*.

Peran-peran kunci spesies mamalia dalam stabilitas dan keberlanjutan dalam ekosistem dapat dijelaskan melalui nilai centralitas dalam analisis sistem jejaring makanan. Ukuran centralitas yang digunakan adalah *degree*, *closeness*, *betweness*, dan *eigenvektor*. Bobot nilai setiap *node* dan *edge* setiap spesies menggunakan nilai Kv hasil model KVT v1.0. Integrasi centralitas ini juga menunjukkan kekokohan jejaring makanan suatu ekosistem (*robustness*). Ekosistem yang berbeda akan memiliki spesies kunci yang berbeda. Spesies kunci di ekosistem semak belukar didominasi oleh spesies-spesies pemangsa mamalia, baik dari tingkatan tropik karnivora maupun omnivora. Sedangkan pada ekosistem hutan, perkebunan/hutan tanaman dan campuran, spesies kunci didominasi oleh spesies yang berperan sebagai penghubung yang menjamin keberlanjutan aliran energi dalam ekosistem pada tingkatan tropik herbivora dan omnivora dengan ukuran badan yang relatif lebih kecil dibandingkan pemangsanya. Ekosistem semak belukar adalah ekosistem paling kokoh dalam aspek stabilitas dan keberlanjutan ekosistem dibandingkan dengan ekosistem lainnya. Setelah itu adalah ekosistem campuran (hutan, perkebunan dan semak belukar dengan komposisi yang seimbang), ekosistem hutan dan terendah adalah ekosistem perkebunan dan hutan tanaman.

Model KVT v1.0 telah membuktikan keandalannya dalam memprediksi dinamika populasi dan stabilitas ekosistem berdasarkan karakteristik morfologi dan fenologi spesies mamalia. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam memahami interaksi kompleks antara mamalia dan lingkungannya, serta menyediakan pendekatan baru untuk mengidentifikasi spesies kunci dalam ekosistem. Sebagai saran, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk mengembangkan dan memperbaiki model yang melibatkan taxa selain mamalia.

Kata kunci: ekosistem, interaksi, keberlanjutan, kekokohan model KVT v1.0, spesies kunci

SUMMARY

IDUNG RISDIYANTO. Development of Ecological Model KVT v1.0 for Assessment of Key Mammalian Species Determining Ecosystem Robustness. Supervised by YANTO SANTOSA, NYOTO SANTOSO dan ARZYANA SUNKAR.

Interactions among species, including predation, competition, and symbiosis, plays a crucial role in the resilience of an ecosystem. Within this network, certain species hold more significant roles for the stability and sustainability of the ecosystem compared to others. Such interaction networks can be described using ecological models. These models simplify complex ecological systems, facilitating an understanding aligned with specific research objectives and enabling predictive insights.

The main objective of this study is to develop a framework for selecting key mammalian species that contribute to ecosystem resilience through quantitative analysis of trophic levels and food webs. To achieve this main objective, the study sets the following specific goals: 1) to develop a trophic level model that can assess the roles and relationships of mammalian species characteristics that contribute to ecosystem resilience, 2) to select and formulate characteristic variables of mammalian species as criteria and indicators for evaluating key species within an ecosystem, and 3) to identify key species and the robustness of food webs across various ecosystem types through network analysis and outputs from the trophic model developed in this research.

The development of the KVT v1.0 model is grounded in ecological theory, emphasizing species-environment interactions, energy flow concepts, and food web dynamics. The model employs a hybrid approach that combines mechanistic, statistical, machine learning, and database system methods. Model algorithms are structured using forester diagrams, translated into computer programming languages. The model database contains information on mammalian species' morphological, phenological, and physiological characteristics gathered from various sources. Model inputs include species presence data, geographic centroid locations, land cover types, and area. Model outputs consist of quantifying species' key values within ecosystems, ecosystem biomass growth, carrying capacity dynamics, biomass allocation for mammalian species, predation interactions, dietary composition, and species population dynamics. All model outputs are presented in numerical form.

The model validation employs two approaches: (i) consistency with the theoretical framework and concepts underlying the model, and (ii) comparison of model output data with reference values. The first approach involves analyzing changes in energy availability and biomass across each trophic level, from producers to n-level consumers, in response to land cover changes. Results indicate consistency with theory, including vegetation biomass growth reaching a climax and stabilizing after a certain period. Validation of model outputs against reference values shows that the model can predict population density for most species at each location, with a relative error of less than 60% derived from $69\% \pm 3\%$ of the data. An RMSE of less than <2 individuals/km² is achieved for $45 \pm 3\%$ of the data, increasing to $70 \pm 3\%$ when RMSE <6 individuals/km². The model's MAPE indicates acceptable performance ($\leq 50\%$) from $63 \pm 3\%$ of the data, with very good performance at $21 \pm 1\%$ and good performance at $41 \pm 3\%$. Validation using NSE reveals that 69.2% of model results have values between 0.8 and 1, indicating that the model output closely approximates or matches the reference values, making it suitable for application.

The model outputs indicate that mammalian species characteristic variables play a significant role in the stability of energy flow within ecosystems. Perturbations in variables such as body weight, diet type, home range, litter size, minimum reproductive age, basal metabolic rate, and habitat preference (arboreal/ground) can alter the dynamics of energy availability and demand for species within the ecosystem per unit time. When biomass demand exceeds availability, the ecosystem experiences ecological stress (ES), leading to population declines for certain species. Perturbations in these characteristic variables can accelerate or delay the occurrence of ES and its frequency, accompanied by shifts in species composition and biodiversity index.

These criteria and indicators can be simplified by formulating characteristic variables into a single key value (Kv) equation representing a species' role within the ecosystem. The Kv value reflects the species' contribution to ecosystem stability and sustainability. Higher Kv values indicate a species with a greater or key role in maintaining the stability and continuity of energy flow within the ecosystem. Each ecosystem has different key mammalian species depending on biomass availability and species presence. Species with high Kv values across ecosystems are typically dominated by mammals from the families *Muridae*, *Sciuridae*, *Tupaiidae*, *Ptilocercidae*, *Hystricidae*, *Viverridae*, and *Herpestidae*.

The key roles of mammalian species in ecosystem stability and sustainability can be explained through centrality values in food web network analysis. The centrality measures used include degree, closeness, betweenness, and eigenvector. Each species' node and edge weights are based on the Kv values derived from the KVT v1.0 model. This integration of centrality measures also indicates the robustness of an ecosystem's food web. Different ecosystems exhibit different key species. In shrubland ecosystems, key species are primarily mammalian predators from both carnivorous and omnivorous trophic levels. In contrast, in forest, plantation/forest plantation, and mixed ecosystems, key species are typically connectors that ensure the continuity of energy flow at the herbivorous and omnivorous trophic levels, with relatively smaller body sizes than their predators. Shrubland ecosystems exhibit the highest robustness in terms of stability and sustainability, followed by mixed ecosystems (with a balanced composition of forest, plantation, and shrubland), forest ecosystems, and lastly, plantation and forest plantation ecosystems.

The KVT v1.0 model has demonstrated its reliability in predicting population dynamics and ecosystem stability based on the morphological and phenological characteristics of mammalian species. This study makes a significant contribution to understanding the complex interactions between mammals and their environment, and provides a novel approach for identifying key species within ecosystems. For future research, further model development and refinement are recommended to include taxa beyond mammals.

Keywords: ecosystem, interactions, KVT v1.0 model, key species, robustness, sustainability.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB



PENGEMBANGAN MODEL EKOLOGI KVT v1.0 UNTUK PENILAIAN SPESIES MAMALIA KUNCI PENENTU KEKOKOHAN EKOSISTEM

@Hak cipta milik IPB University

IDUNG RISDIYANTO

Disertasi
sebagai salah satu syarat melaksanakan penelitian pada
Program Studi Konservasi Biodiversitas Tropika

**PROGRAM STUDI KONSERVASI BIODIVERSITAS TROPIKA
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Dr. Ir. Wiratno, M.Sc, IPU
2. Dr. Ir. Achmad Farajallah M.Si

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Dr. Ir. Wiratno, M.Sc, IPU
2. Dr. Ir. Achmad Farajallah M.Si

Judul Disertasi : Pengembangan Model Ekologi KVT v1.0 Untuk Penilaian
Spesies Mamalia Kunci Penentu Kekokohan Ekosistem
Nama : Idung Risdiyanto
NIM : E3601202004

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Yanto Santosa, D.E.A

Pembimbing 2:
Dr. Ir. Nyoto Santoso, M.S.

Pembimbing 3:
Dr. Ir. Arzyana Sunkar, M.Sc.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi Konservasi Biodiversitas Tropika
Prof. Dr. Ir. Yanto Santosa, D.E.A
NIP 196010041985011001

Dekan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan
Prof. Dr. Ir. Naresworo Nugroho, MS
NIP 196501221989031002



Tanggal Ujian Tertutup:
25 November 2024

Tanggal Lulus:
20 JAN 2025

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan atas segala nikmat dan karunia-Nya sehingga karya ilmiah dengan judul “Pengembangan Model Ekologi KVT v1.0 untuk Penilaian Spesies Mamalia Kunci Penentu Kekokohan Ekosistem” dapat diselesaikan. Disertasi ini adalah hasil dari proses yang panjang, sejak penulis melakukan survey dan riset lapangan tentang keanekaragaman hayati dan nilai konservasi tinggi di pulau Kalimantan pada tahun 2012 hingga 2022. Karya ilmiah ini terdiri atas empat topik utama, yaitu pendekatan teoritis model ekologi dan spesies kunci, pengembangan model KVT v1.0, kriteria dan indikator spesies kunci ekosistem dan penentuan spesies kunci dalam jejaring makanan.

Terima kasih penulis sampaikan kepada komisi pembimbing Prof. Dr. Ir. Yanto Santosa, D.E.A, Dr. Ir. Nyoto Santoso, M.S. dan Dr. Ir. Arzyana Sunkar, M.Sc., yang telah banyak memberikan saran dan masukan yang sangat berharga hingga dapat menghasilkan karya ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator seminar, pimpinan sidang ujian tertutup dan terbuka, penguji luar komisi pembimbing Dr.Ir. Wiratno, M.Sc dan Dr.Ir. Achmad Farajallah, M.Si dan penguji program studi Prof. Dr. Ir. Burhanuddin Masyud M.S. Penghargaan penulis sampaikan kepada Yayasan Patembayatan Sinau Bumi, Yayasan Pusaka Kalam, Yayasan PILI, Aksenta dan HCVRN yang telah membantu selama proses penelitian. Ungkapan terima kasih penuh cinta juga disampaikan kepada istri dan anak-anak penulis Ruri Irawati, Rubee, Renaya dan Andhara yang telah menjadi penyemangat dan memberikan energi yang luar biasa, cinta dan kasih sayangnya bagi penulis hingga karya ilmiah ini bisa diselesaikan.

Semoga disertasi ini menjadi karya ilmiah yang bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan parapihak yang membutuhkannya

Bogor, Januari 2025

Idung Risdiyanto



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Kerangka Pemikiran	4
1.6 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	6
II PENDEKATAN TEORITIS: MODEL EKOLOGI DAN SPESIES KUNCI KEKOKOHAN EKOSISTEM	9
Abstrak	9
2.1 Pendahuluan	9
2.2 Pemodelan ekologi	10
2.3 Spesies kunci (<i>Keystone species</i>)	15
2.4 Kekokohan ekosistem	17
2.5 Kesimpulan	19
III GAMBARAN LOKASI PENELITIAN	21
3.1 Pendahuluan	21
3.2 Geomorfologi dan tanah	22
3.3 Iklim dan hidrologi	23
3.4 Hutan dan tutupan lahan bervegetasi	24
3.5 Keanekaragaman hayati	27
IV PENGEMBANGAN MODEL TROPIK KVT v1.0 UNTUK PENILAIAN PERAN KARAKTERISTIK SPESIES MAMALIA DALAM EKOSISTEM	31
Abstrak	31
4.1 Pendahuluan	31
4.2 Metode	33
4.2.1 Perangkat dan data	33
4.2.2 Rancang bangun model mekanistik <i>trophic level</i>	34
4.2.3 Desain <i>look up table</i> peubah-peubah karakteristik spesies mamalia	38
4.2.4 Kalibrasi dan validasi model	40
4.2.5 Analisis kluster data tutupan lahan dan kehadiran spesies mamalia	42
4.2.6 Analisis peran peubah karakteristik spesies mamalia	42
4.3 Hasil dan pembahasan	42
4.3.1 Deskripsi lokasi dan data survey spesies mamalia	42
4.3.2 Algoritma model dan <i>user interface</i>	44
4.3.3 Antar muka pengguna (<i>User interface</i>) model	45
4.3.4 Validasi model	50

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

4.3.5 Peran peubah-peubah karakteristik spesies mamalia	54
4.4 Simpulan	59
V SELEKSI KARAKTERISTIK SPESIES MAMALIA KUNCI DALAM EKOSISTEM MENGGUNAKAN MODEL KVT v1.0	63
Abstrak	63
5.1 Pendahuluan	63
5.2 Metode	65
5.2.1 Perangkat dan data	65
5.2.2 Analisis perturbasi untuk pengujian sensitivitas peubah karakteristik spesies mamalia	65
5.2.3 Analisis Faktorial untuk seleksi peubah karakteristik spesies mamalia	66
5.3 Hasil dan pembahasan	67
5.3.1 Pertubasi peubah dan perubahan alokasi biomassa ekosistem	67
5.3.2 Seleksi peubah-peubah kriteria dan indikator spesies kunci	69
5.3.3 Formulasi kuantifikasi peubah spesies kunci dalam ekosistem	73
5.3.4 Identifikasi spesies kunci	74
5.4 Simpulan	76
VI ANALISIS JEJARING PENENTUAN SPESIES MAMALIA KUNCI DAN KEKOKOCHAN JEJARING MAKANAN DALAM EKOSISTEM	79
Abstrak	79
6.1 Pendahuluan	79
6.2 Metode	80
6.2.1 Perangkat dan Data	80
6.2.2 Analisis jejaring makanan (<i>Food network analysis</i>)	81
6.2.3 Analisis kekokohan jejaring makanan dan spesies mamalia kunci ekosistem	83
6.3 Hasil dan pembahasan	84
6.3.1 Nilai-nilai centralitas spesies dalam jejaring makanan	84
6.3.2 Kekokohan jejaring makanan dan spesies kunci ekosistem	93
6.4 Simpulan	95
VII PEMBAHASAN UMUM	97
7.1 Spesies mamalia kunci untuk konservasi biodiversitas	97
7.2 Penetapan spesies mamalia kunci vs spesies prioritas	98
7.3 Model KVT v1.0 dan analisis jejaring makanan untuk menentukan spesies kunci mamalia suatu ekosistem	99
7.4 Kelebihan dan keterbatasan model	103
7.4 Tantangan, peluang pengembangan dan implikasinya	104
VIII SIMPULAN UMUM DAN SARAN	107
8.1 Simpulan	107
8.2 Saran	107
DAFTAR PUSTAKA	109
LAMPIRAN	133
RIWAYAT HIDUP	229

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Proporsi tutupan lahan di 78 lokasi survey (%)	25
Tabel 3.2	Jumlah spesies mamalia dan tingkatan tropiknya di setiap lokasi survey	28
Tabel 4.1	Data-data yang digunakan dalam penelitian	33
Tabel 4.2	Alat yang digunakan dalam penelitian	34
Tabel 4.3	<i>Look up table</i> peubah karakteristik spesies mamalia	38
Tabel 4.4	Jumlah lokasi dan spesies mamalia di setiap kluster	43
Tabel 4.5	Jumlah lokasi dan spesies mamalia di setiap kluster	43
Tabel 5.1	Persentase rata-rata absolut perubahan alokasi biomassa ekosistem untuk spesies mamalia yang disebabkan pertubasi peubah model (%)	68
Tabel 5.2	Beban faktor yang dirotasi, komunalitas dan koefisien setiap peubah pada ekosistem K1 (hutan tanaman dan perkebunan)	71
Tabel 5.3	Beban faktor yang dirotasi, komunalitas dan koefisien setiap peubah pada ekosistem K2 (dominasi semak belukar)	71
Tabel 5.4	Beban faktor yang dirotasi, komunalitas dan koefisien setiap peubah pada ekosistem K3 (hutan)	71
Tabel 5.5	Beban faktor yang dirotasi, komunalitas dan koefisien setiap peubah pada ekosistem K4 (hutan, perkebunan dan semak belukar yang setimbang)	72
Tabel 5.6	Kriteria dan indikator penentuan spesies mamalia kunci dari model KVT v.1	72
Tabel 5.7	Lima besar spesies kunci penjamin keberlangsungan alokasi biomassa untuk keanekaragaman spesies mamalia.	75
Tabel 6.1	Tipe ekosistem, lokasi dan jumlah kehadiran spesies untuk analisis jejeraing makanan	81
Tabel 6.2	Akumulasi dan rata-rata <i>centrality</i> jejaring makanan di setiap ekosistem	92
Tabel 6.3	Spesies-spesies yang berkontribusi sebesar 1/3 dari akumulasi nilai C_D dalam jejaring makanan di setiap ekosistem	85
Tabel 6.4	Kontribusi relatif spesies mamalia sebagai penghubung dan pengendali aliran energi dalam jejaring makanan suatu ekosistem.	88
Tabel 6.5	Spesies mamalia dengan nilai C_B yang berpengaruh dalam jejaaring makanan di ekosistem tertentu.	89
Tabel 6.6	Spesies mamalia dengan nilai C_E yang berpengaruh dalam jejaaring makanan di ekosistem tertentu.	91
Tabel 6.7	Bobot faktor dan peubah sentralitas jejaring makan	94
Tabel 6.8	Spesies kunci dan kekokohan jejaring makanan dalam ekosistem	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Bagan alir kerangka pemikiran penelitian pengembangan model ekologi	7
Gambar 1.2	Peta jalan pengembangan model ekologi	7
Gambar 2.1	Persyaratan pendekatan model berdasarkan pada ketersediaan data dan pengetahuan (<i>ODE: ordinary differential equations; IBM: individual based models; GLM: generalized linear models; GAM: generalized additive models; ANN: artificial neural networks</i>) (Schuwirth <i>et al.</i> 2019a)	11
Gambar 2.2	Tiga dimensi skala (spasial, waktu dan organisasi) dalam penelitian fungsi-fungsi ekologi dan biodiversitas (Gonzalez <i>et al.</i> 2020b)	12
Gambar 2.3	Ilustrasi ekologi tropik direpresentasikan sebagai jaring makanan atau sebagai rantai/piramida (Van Dover 2021)	13
Gambar 2.4	Jumlah publikasi identifikasi spesies kunci tahun 1977-2022 di berbagai tipe ekosistem (sumber: scopus.com)	16
Gambar 2.5	Publikasi identifikasi spesies kunci tahun 1977-2022 menurut ekosistem dan obyek kajian (sumber: scopus.com)	17
Gambar 3.1	Trend <i>enhanced vegetation index</i> (EVI) di pulau Kalimantan tahun 2000-2023	24
Gambar 3.2	Proporsi tutupan lahan bervegetasi di 78 lokasi survey (data diurutkan dari luas hutan yang terbesar)	25
Gambar 4.1	Struktur data spasial dan tabular, titik merah menunjukkan lokasi-lokasi survei spesies mamalia	33
Gambar 4.2	Simbol-simbol diagram <i>forrester</i> (Jiménez <i>et al.</i> 2001)	35
Gambar 4.3	Skema nilai awal model alokasi dan proporsi energi pada setiap tingkat tropic (dimodifikasi dari (Odum 1994))	36
Gambar 4.4	Keragaman tutupan lahan di setiap kluster (K1, K2, K3, K4)	43
Gambar 4.5	Forester diagram model trophic cascade KVT v1.0	45
Gambar 4.6	Jendela antar muka utama model KVT 1.0	46
Gambar 4.7	Jendela antar muka komposisi pakan	47
Gambar 4.8	Jendela antar muka dinamika populasi (natalitas vs mortalitas)	48
Gambar 4.9	Jendela hubungan pemangsa (predator vs prey)	49
Gambar 4.10	Jendela validasi model	50
Gambar 4.11	Respon transformasi ketersediaan biomass pada tingkat tropik produser menurut perbedaan kelompok tutupan lahan (K1, K2, K3 dan K4).	51
Gambar 4.12	Transformasi alokasi biomassa setiap tingkatan tropik setiap kluster (K1, K2, K3 dan K4)	52
Gambar 4.13	Perkembangan rata-rata jumlah individu mamalia besar (atas) dan mamalia kecil (bawah) di setiap kluster (K1, K2, K3 dan K4)	53
Gambar 4.14	Distribusi frekuensi relatif setiap nilai validasi hasil model K1, K2, K3 dan K4 (a) KR, (b) RMSE, (c) MAPE dan (d) NSE	54
Gambar 4.15	Keragaman tahun awal dan frekuensi kejadian tekanan ekologis menurut jumlah keragaman spesies di setiap kelompok ekosistem dan sub kelompok.	55
Gambar 4.16	Hubungan rasio jumlah spesies preferensi habitat arboreal dengan permukaan tanah terhadap (atas) waktu awal dan (bawah) frekuensi kejadian tekanan ekologis	59
Gambar 5.1	Perubahan alokasi biomassa ekosistem untuk mamalia akibat pertubasi peubah karakteristik spesies mamalia dalam model di setiap ekosistem	



	(K1: perkebunan dan hutan tanaman, K2: semak belukar, K3: hutan dan K4: campuran)	68
Gambar 5.2	Perubahan indeks keragaman Shannon Wiener (H') dengan peubah normal vs pertubasi peubah karakteristik mamalia (K1: perkebunan dan hutan tanaman, K2: semak belukar, K3: hutan dan K4: campuran)	69
Gambar 5.3	<i>Scree plot</i> analisis faktor alokasi biomassa ekosistem untuk mamalia di setiap ekosistem (K1: perkebunan dan hutan tanaman, K2: semak belukar, K3: hutan dan K4: campuran)	70
Gambar 6.1	Ukuran <i>degree centrality</i> setiap spesies dalam jejaring makanam di setiap ekosistem	86
Gambar 6.2	Contoh nilai <i>closeness centrality</i> jejaring makanan di ekosistem semak belukar (K2a). (ctt: Semakin besar ukuran bulatan menunjukkan nilai yang semakin tinggi)	87
Gambar 6.3	Ukuran <i>betweness centrality</i> setiap spesies dalam jejaring makanan di setiap ekosistem	88
Gambar 6.4	Ukuran <i>eigenvector centrality</i> setiap spesies dalam jejaring makanan di setiap ekosistem	91

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Lokasi survey dan daftar kehadiran spesies mamalia	135
Lampiran 2 <i>Look up Table</i> (LuT) karakteristik spesies	172
Lampiran 3 Kepadatan populasi spesies mamalia (individu/km ²)	181
Lampiran 4 Persamaan, script dan GUI Model KVT v1.0	191
Lampiran 5 Regresi peubah karakteristik spesies vs kejadian dan frekuensi tekanan ekologis	213
Lampiran 6 Nilai Kv spesies di setiap ekosistem	219
Lampiran 7 Nilai-nilai centrality spesies dalam jejaring makanan	224