

PEWARNAAN GRAF DENGAN ALGORITMA WELCH-POWELL UNTUK OPTIMALISASI PENGELOLAAN SUMBER DAYA ALAM DI HUTAN TROPIS

*D. E. Youlistia, Sabrina, Serli, D. F. Putri, dan F.D.T. Amijaya.

Program Studi S-1 Matematika, Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mulawarman, Jl. Kuaro, Gn. Kelua, Kota Samarinda, Kalimantan Timur
dellaevayoulistia@gmail.com *corresponding author, sabrina04juli03@gmail.com,
srlnli27167@gmail.com, desifebrianip@fmipa.unmul.ac.id, fidiadta@fmipa.unmul.ac.id

Abstrak

Hutan tropis merupakan ekosistem kompleks yang kaya akan keanekaragaman hayati, dan dapat digolongkan ke dalam 13 jenis zona berdasarkan pemanfaatannya. Penggolongan wilayah geografis ke dalam jenis zona tertentu berpotensi melahirkan gesekan dan konflik kepentingan, misalnya apabila zona konservasi bersebelahan dengan zona produksi kayu. Untuk mencegah munculnya konflik seperti itu, maka perlu dilakukan pengelompokan 13 jenis zona menjadi beberapa kelompok, sehingga jenis-jenis zona dalam kelompok yang sama relatif “aman” untuk bersebelahan secara geografis. Masalah tersebut diselesaikan dengan model matematis berbasis teori graf, khususnya dengan pewarnaan graf dan algoritma Welch-Powell. Hasil temuan mengelompokkan 13 jenis zona hutan tropis menjadi 4 kelompok yang relatif aman untuk bersebelahan secara geografis. Pengelompokan tersebut dapat digunakan oleh pemerintah untuk menetapkan batas-batas geografis dari setiap zona.

Kata kunci: Pewarnaan graf, algoritma Welch–Powell, hutan tropis, zonasi.

1. Pendahuluan

Hutan tropis merupakan salah satu ekosistem terpenting di dunia yang memiliki keanekaragaman hayati tinggi dan berperan vital dalam menjaga keseimbangan iklim global. Selain berfungsi sebagai paru-paru dunia, hutan tropis juga menyediakan berbagai sumber daya alam yang penting bagi kehidupan manusia, seperti hasil hutan kayu dan non-kayu, keanekaragaman hayati, serta jasa ekosistem lainnya. Pengelolaan hutan tropis yang berkelanjutan memerlukan zonasi atau penggolongan wilayah-wilayah hutan tropis sesuai jenis pemanfaatannya. Dilansir dari [5], terdapat 13 jenis zona.

Perlu pertimbangan khusus untuk menggolongkan suatu wilayah sebagai zona tertentu, terkait dengan zona di sekitarnya. Perlu dihindari adanya dua zona bersebelahan yang berpotensi melahirkan konflik dalam penggunaan sumber daya. Misalnya, jika sebuah zona konservasi yang berfokus pada pelestarian flora dan fauna bersebelahan dengan sebuah zona produksi kayu yang berfokus pada penebangan dan ekstraksi, maka terjadi perlakuan yang amat berbeda pada daerah perbatasan antara keduanya, sehingga berpotensi terjadi konflik kepentingan atau bahkan gesekan.

Tabel 1. Zona sumber daya hutan tropis.

No	Zona Hutan Tropis
1	Zona Konservasi Alam
2	Zona Produksi Kayu
3	Zona Perlindungan Ekosistem
4	Zona Keanekaragaman Hayati
5	Zona Agroforestry
6	Zona Perikanan
7	Zona Pemanfaatan Non-Kayu
8	Zona Pemanfaatan Energi
9	Zona Wisata Alam
10	Zona Rehabilitasi dan Restorasi
11	Zona Penelitian dan Pendidikan
12	Zona Masyarakat
13	Zona Pengembangan Infrastruktur

Salah satu pendekatan matematis yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah teori graf, khususnya dengan pewarnaan graf. Teori graf memungkinkan representasi hubungan antar zona. Pewarnaan graf memungkinkan pengelompokan jenis-jenis zona, sehingga setiap kelompok terdiri dari zona-zona yang tidak berkonflik. Hasil pengelompokan tersebut kemudian dapat dijadikan rekomendasi kepada pemerintah sebagai panduan dalam penetapan zonasi.

Secara teknis, pewarnaan graf yang dimaksud dilakukan dengan algoritma Welch-Powell. Hasil temuan menunjukkan bahwa 13 jenis zona dapat dikelompokkan menjadi 4 kelompok.

2. Tinjauan Pustaka dan Metodologi

2.1 Pengelolaan Sumber Daya Hutan Tropis

Hutan merupakan habitat bagi berbagai jenis flora dan fauna dalam jumlah yang sangat besar serta memberikan banyak manfaat bagi makhluk hidup, seperti menyerap karbon dioksida dari gas buang kendaraan bermotor dan industri yang menyebabkan polusi udara. Selain itu, hutan juga berperan dalam membentuk waduk alami yang dapat mencegah banjir serta tanah longsor. Namun, tindakan perusakan hutan masih sering terjadi, seperti pembalakan liar dan pembakaran hutan untuk membuka lahan perkebunan kelapa sawit tanpa adanya upaya reboisasi [6].

Indonesia memiliki berbagai tipe hutan dengan karakteristik dan fungsi yang berbeda-beda. Hutan tropis di Indonesia merupakan ekosistem yang sangat kaya dengan tingkat keanekaragaman hayati yang tinggi. Hutan ini disebut hutan tropis karena lokasinya di sekitar garis khatulistiwa, yang ditandai dengan iklim khas berupa suhu serta kelembaban yang senantiasa tinggi. Selain itu, hutan tropis memiliki curah hujan tahunan yang melebihi 2000 mm, dengan curah hujan bulanan yang tidak kurang dari 100 mm [11].

Sumber daya alam merupakan segala sesuatu yang tersedia secara alami di bumi. Sumber daya ini menjadi dasar bagi berbagai jenis sumber daya lainnya. Secara umum, sumber daya alam terbagi menjadi dua jenis: sumber daya yang dapat diperbarui, seperti hutan, dan sumber daya yang tidak dapat diperbarui, seperti bahan tambang. Hutan, sebagai bagian dari sumber daya alam yang dapat diperbarui, perlu dipahami lebih lanjut dalam kaitannya dengan keanekaragaman hayati serta interaksi antara komponen biotik dan abiotik dalam ekosistem. Berdasarkan karakteristiknya, sumber daya hutan memiliki dua fungsi utama. Pertama, sebagai penyedia sumber daya biologis (*biological resources* atau *natural stock*), yang secara berkelanjutan menghasilkan barang dan jasa alami melalui proses ekosistem. Kedua, sebagai *natural flows*, yang memungkinkan ekosistem terus memberikan manfaat bagi kehidupan [5].

Kerusakan hutan tropis dipengaruhi oleh berbagai faktor yang berbeda di setiap negara, namun secara umum dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori. Pertama, faktor sosial-ekonomi, seperti pertumbuhan penduduk, perkembangan ekonomi, dan tingkat kemiskinan. Kedua, faktor fisik dan lingkungan, termasuk kedekatan dengan sungai dan jalan, jarak ke pusat kota, kondisi topografi, serta tingkat kesuburan tanah. Ketiga, kebijakan pemerintah yang mencakup regulasi di sektor pertanian, kehutanan, dan sektor lainnya. Untuk menjaga kelestarian hutan, perencanaan dan pengelolaan sumber daya hutan yang baik harus dilakukan secara terstruktur dan berkelanjutan [7].

2.2 Teori Graf

Teori graf adalah cabang dari matematika yang mempelajari hubungan antara objek-objek yang direpresentasikan sebagai titik (simpul atau *vertex*) dan garis penghubungnya (sisi atau *edge*). Graf secara formal didefinisikan sebagai pasangan himpunan (V, E) , di mana V adalah himpunan tidak kosong dari simpul-simpul dan E adalah himpunan sisi-sisi yang menghubungkan pasangan simpul. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Leonhard Euler pada abad ke-18 melalui masalah Jembatan Königsberg yang terkenal [1].

Dalam teori graf, terdapat berbagai jenis graf yang diklasifikasikan berdasarkan sifat-sifatnya. Graf sederhana adalah graf yang tidak memiliki sisi ganda atau *loop*, sedangkan graf multigraf dapat memiliki sisi ganda. Graf terhubung adalah graf di mana setiap pasangan simpul memiliki lintasan penghubung (langsung maupun tidak langsung), sementara graf tak terhubung tidak memenuhi kondisi ini. Selain itu, graf berarah (digraf) memiliki arah pada setiap sisinya, berbeda dengan graf tak berarah yang sisinya tidak memiliki arah tertentu [3]. Yang digunakan dalam penelitian ini adalah graf sederhana yang tidak berarah.

Secara formal, graf merupakan suatu sistem yang dinotasikan sebagai $G = (V, E)$. Sistem ini terdiri dari himpunan simpul $V = \{v_1, v_2, \dots\}$ serta himpunan sisi $E = \{e_1, e_2, \dots\}$. Setiap sisi e_k dalam graf menghubungkan sepasang titik (v_i, v_j) secara tak terurut. Simpul-simpul v_i dan v_j yang dihubungkan oleh sisi e_k disebut pasangan simpul bertetangga dan disebut sebagai titik ujung dari sisi tersebut. Derajat dari suatu simpul v , disimbolkan $\deg v$, adalah banyaknya tetangga dari simpul tersebut [2].

2.3 Pewarnaan Graf

Pewarnaan graf merupakan salah satu permasalahan optimasi dalam Teori Graf yang banyak dikaji. Masalah ini berawal dari pewarnaan peta negara-negara dengan aturan bahwa dua negara yang berbatasan tidak boleh memiliki warna yang sama.

Fenomena tersebut kemudian direpresentasikan sebagai graf planar, yaitu graf yang dapat digambar di bidang datar tanpa adanya persilangan sisi, di mana setiap negara direpresentasikan sebagai titik dan perbatasan antar negara sebagai sisi. Permasalahan ini kemudian dikenal sebagai *Four Color Problem*, yang menyatakan bahwa setiap graf planar dapat diwarnai menggunakan paling banyak empat warna. Masalah ini pertama kali muncul dalam surat De Morgan kepada Hamilton pada tahun 1852 [9].

Pewarnaan simpul adalah pemetaan himpunan simpul di suatu graf ke himpunan warna sehingga setiap pasang simpul yang bertetangga selalu memiliki warna yang berbeda. Banyaknya warna paling sedikit yang mungkin disebut sebagai bilangan kromatik dari graf tersebut. Simpul-simpul yang warnanya sama akan membentuk kelompok yang satu sama lainnya tidak terhubung sisi [4].

2.4 Algoritma Welch-Powell

Algoritma Welch-Powell merupakan salah satu metode pewarnaan graf yang bekerja secara *greedy* dengan mengurutkan simpul berdasarkan derajatnya terlebih dahulu [10]. Langkah-langkahnya sebagai berikut [8]

1. Urutkan simpul-simpul graf menjadi v_1, v_2, \dots, v_n sehingga $\deg v_1 \geq \deg v_2 \geq \dots \geq \deg v_n$.
2. Warnai simpul v_1 dengan warna 1.
3. Inisiasi $i = 2$.
4. Jika v_1, \dots, v_{i-1} sudah diwarnai, warnai simpul v_i dengan warna terkecil yang belum digunakan oleh tetangga-tetangga v_i di antara v_1, \dots, v_{i-1} .
5. Jika masih ada simpul yang belum diwarnai, ubah i menjadi $i + 1$.
6. Ulangi langkah 4 sampai semua simpul diwarnai.

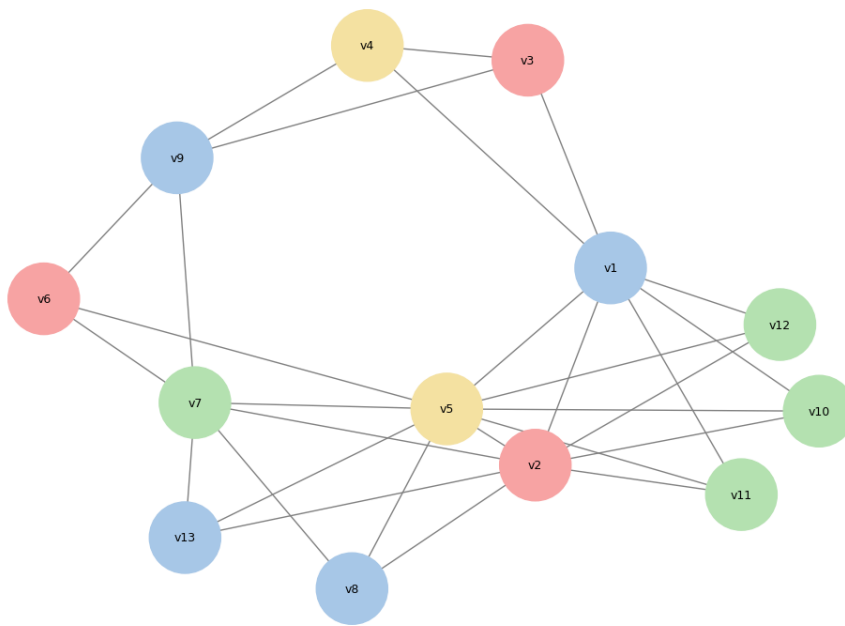
2.5 Metodologi

Langkah-langkah penelitian ini adalah sebagai berikut,

1. Studi literatur untuk mengetahui jenis-jenis zona hutan tropis beserta kaitan secara lingkungan, sosial, dan ekonomi antar zona-zona tersebut.
2. Memodelkan jenis-jenis zona sebagai graf, dengan setiap simpul mewakili satu jenis zona dan sisi antara dua simpul mewakili adanya potensi konflik jika dua zona tersebut bersebelahan secara geografis.
3. Melakukan pewarnaan graf dengan algoritma Welch-Powell.
4. Mengidentifikasi simpul-simpul dengan warna yang sama.
5. Merumuskan rekomendasi bagi pemerintah untuk kepentingan zonasi wilayah hutan tropis.

3. Hasil dan Pembahasan

Seperti disebutkan pada Tabel 1 di bagian Pendahuluan, terdapat 13 jenis zona hutan tropis berdasarkan pemanfaatan sumber dayanya. Setelah dilakukan pemetaan hubungan antar zona, dan dilakukan pewarnaan dengan algoritma Welch-Powell, diperoleh graf sebagai berikut.



Gambar 1. Pewarnaan graf zonasi hutan tropis.

Dari pewarnaan tersebut, diperoleh pengelompokan simpul-simpul yang sewarna sebagai berikut.

1. v_1, v_8, v_9, v_{13} yaitu zona konservasi alam, zona pemanfaatan energi, zona wisata alam, dan zona pengembangan infrastruktur boleh bersebelahan secara geografis.
2. v_2, v_3, v_6 yaitu zona produksi kayu, zona perlindungan ekosistem, dan zona perikanan bersebelahan secara geografis.
3. v_4, v_5 yaitu zona keanekaragaman hayati dan zona *agroforestry* boleh bersebelahan secara geografis.
4. $v_7, v_{10}, v_{11}, v_{12}$ yaitu zona pemanfaatan non-kayu, zona rehabilitasi dan restorasi, zona penelitian dan pendidikan, serta zona masyarakat boleh bersebelahan secara geografis.

Pengelompokan di atas dapat diinformasikan kepada pemerintah sebagai rekomendasi atau panduan ketika menetapkan zonasi dari wilayah-wilayah dalam suatu hutan tropis.

4. Simpulan

Penelitian ini berhasil membentuk model graf dari zonasi hutan tropis, di mana setiap zona seperti konservasi, produksi, rehabilitasi, dan lainnya direpresentasikan sebagai simpul dan keterkaitannya digambarkan sebagai sisi. Model ini memungkinkan visualisasi konflik kepentingan antar zona dan menjadi dasar analisis dalam pengelolaan wilayah hutan yang kompleks. Algoritma Welch-Powell telah diimplementasikan secara sistematis untuk mewarnai graf zonasi. Proses pewarnaan dilakukan dengan mengurutkan simpul berdasarkan derajat tertinggi, kemudian memberikan warna pada simpul yang tidak saling bertetangga. Hasilnya menunjukkan bahwa pewarnaan dapat diselesaikan dengan empat warna, menandakan efisiensi algoritma ini dalam membagi zona secara optimal tanpa konflik tumpang tindih fungsi. Berdasarkan hasil pewarnaan graf, algoritma ini mampu meminimalisasi konflik antar zona, terutama dalam hal pemanfaatan lahan dan pelestarian lingkungan. Dengan adanya pemisahan fungsi zona yang jelas,

seperti antara area konservasi dan area pemanfaatan energi atau masyarakat, pengelolaan sumber daya dapat dilakukan lebih terstruktur, mendukung keseimbangan ekosistem, dan memberi peluang keberlanjutan yang lebih baik bagi masyarakat sekitar hutan.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar penerapan algoritma pewarnaan graf, seperti Welch-Powell, diperluas pada kasus nyata dengan data spasial yang lebih kompleks serta mempertimbangkan faktor ekologis dan sosial dalam penentuan zona. Integrasi dengan sistem informasi geografis (SIG) juga dapat meningkatkan akurasi dan aplikabilitas hasil dalam pengambilan keputusan pengelolaan hutan.

Daftar Pustaka

- [1] Astuti, S. 2011. Penyusunan jadwal ujian mata kuliah dengan algoritma pewarnaan graf Welch Powell. *Jurnal Dian*, 11(1), 68–74.
- [2] Buhaerah, Buhaerah, Busrah, Zulfiqar, Sanjaya, Herlan. 2022. *Teori Graf dan Aplikasinya*. Penerbit: LSQ (Living Spiritual Quotient), Makassar.
- [3] Dewi, N. R. 2020. Penerapan pewarnaan graf terhadap penyusunan jadwal seminar proposal skripsi di Prodi Pendidikan Matematika UIN Raden Intan Lampung. *Buana Matematika: Jurnal Ilmiah Matematika dan Pendidikan Matematika*, 10(1), 103–112.
- [4] Kabang N. K., Yundari, Fran F. 2020. Bilangan kromatik pada graf bayangan dan graf middle dari graf bintang. *Buletin Ilmiah Mat. Stat. dan Terapannya*. 9(2):329-226.
- [5] Kissinger, Udiansyah, Kanti R. 2021. *Manajemen Hutan Tropika Basah*. Banjarbaru: CV. Banyubening Cipta Sejahtera.
- [6] Marbun F. A. H., dan Gusmira E. 2024. Literatur review: studi tentang distribusi suhu dan dampaknya terhadap ekosistem hutan tropis. *Jurnal Sains dan Sains Terapan*. 2(2):8-11.
- [7] Puntodewo A., Dewi S., Tarigan J. 2003. *Sistem Informasi Geografis untuk Pengelolaan Sumberdaya Alam*. Bogor: Center for International Forestry Research.
- [8] Putra F. S. E., Darmaji, Soetrisno. 2017. Implementasi metode pewarnaan graf menggunakan algoritma Welch Powell untuk simulasi penerapan frekuensi radio di Jawa Timur. *Jurnal Sains dan Seni ITS*. 6(2):73-76.
- [9] Slamain. 2023. *Teori Graf dan Aplikasinya*. Trenggalek: Rasi Bintang Offset.
- [10] Sofiani A. I., Anggraini N. F., Alfares M., Khaira U. 2025. Penerapan algoritma Welch Powell pada pewarnaan graf untuk menentukan destinasi wisata kuliner di Kota Jambi. *Jurnal Ilmiah Matematika*. 13(1):182-189.
- [11] Sorondaya N. M., Peday H. F. Z., Runtuboi Y. Y. 2021. Tipe dan penyebaran ekosistem hutan di pulau Mansinam Kabupaten Manokwari. *Jurnal Kehutanan Papuasiasia*. 7(1):99-120.