

PEMANFAATAN TEORI GRAF DALAM PEMODELAN DAN ANALISIS STRUKTUR JARINGAN DENGAN PENEKANAN PADA KONSEP KONEKTIVITAS DAN LINTASAN

Anggun Nuraini

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Sriwijaya, Sumatra Selatan, Indonesia

e-mail: anggunnurain00@gmail.com

Sisca Octarina

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Sriwijaya, Sumatra Selatan, Indonesia

e-mail: sisca_octarina@unsri.ac.id

Fitri Maya Puspita

Program Studi Matematika, FMIPA, Universitas Sriwijaya, Sumatra Selatan, Indonesia

e-mail: fitrimayapuspita@unsri.ac.id

Abstrak

Teori graf merupakan salah satu cabang matematika diskrit yang berfokus pada representasi dan analisis struktur jaringan melalui simpul (*vertices*) dan sisi (*edges*). Konsep konektivitas dan lintasan menjadi aspek penting dalam pemodelan berbagai system, karena keduanya menentukan sejauh mana elemen dalam jaringan dapat saling terhubung serta bagaimana jalur optimal dapat ditemukan. Pemodelan jaringan berbasis teori graf memungkinkan pemahaman lebih mendalam terhadap struktur kompleks, baik pada system transportasi, komunikasi, maupun jaringan biologis. Metode yang digunakan dalam kajian ini bersifat deskriptif analitis dengan meninjau literatur terkini mengenai teori graf dan penerapannya. Hasil analisis menunjukkan bahwa konektivitas berperan dalam menjaga keterhubungan system secara menyeluruh, sedangkan lintasan mendukung efisiensi interaksi antar simpul. Kesimpulannya, integrasi kedua konsep ini dapat meningkatkan efektivitas desain, evaluasi, dan optimasi jaringan.

Kata Kunci: Teori Graf, Konektivitas, Lintasan, Struktur Jaringan.

Abstract

Graph theory is a branch of discrete mathematics that focuses on the representation and analysis of network structures through vertices and edges. Connectivity and path are essential aspects in modeling various systems, as they determine the extent to which elements in a network are connected and how optimal routes can be identified. Network modeling based on graph theory enables a deeper understanding of complex structures, whether in transportation systems, communication, or biological networks. This study employs a descriptive-analytical method by reviewing recent literature on graph theory and its applications. The result indicate that connectivity in interactions between nodes. In conclusion, the integration of both concepts enhances the effectiveness of network design, evaluation, and optimization

Keywords: Graph Theory, Connectivity, Path, Network Structure.

PENDAHULUAN

Matematika memiliki peran penting dalam pengembangan berbagai disiplin ilmu dan teknologi. Salah satu cabang matematika yang berperan dalam merepresentasikan hubungan antar objek adalah teori graf. Teori graf mempelajari simpul (*simpul*) dan sisi (*edges*) yang menghubungkan simpul-simpul tersebut, sehingga mampu memberikan Gambaran mengenai struktur dan keterhubungan suatu sistem. Konsep ini digunakan secara luas untuk memahami fenomena yang melibatkan jaringan, mulai dari transportasi, komunikasi, distribusi energi, hingga

jejaring sosial, dimana pemahaman terhadap struktur jaringan dapat mempermudah analisis dan perancangan sistem yang lebih efisien (Netirith & Ji, 2022).

Permasalahan utama dalam analisis jaringan adalah menentukan tingkat keterhubungan antar simpul dan menemukan lintasan yang paling efisien. Dalam jaringan transportasi, konektivitas menjamin setiap lokasi dapat saling terhubung sehingga pergerakan barang dan orang menjadi lebih lancar dan aman. Sedangkan pada jaringan komunikasi, lintasan optimal memungkinkan transmisi data

berlangsung cepat dan stabil tanpa mengorbankan kualitas jaringan. Kegagalan dalam salah satu aspek ini dapat menimbulkan gangguan besar pada fungsi jaringan secara keseluruhan, termasuk penurunan kinerja, keterlambatan pengiriman informasi, dan peningkatan risiko kerusakan sistem (Peranginangin, 2024).

Analisis konektivitas memungkinkan penilaian sejauh mana jaringan tetap berfungsi ketika beberapa simpul dan sisi mengalami gangguan atau kegagalan. Hal ini sangat penting pada sistem kritis seperti jaringan otak, jaringan listrik, dan sistem transportasi perkotaan, dimana efektivitas dan kerentanan jaringan harus dianalisis secara seksama. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa simpul-simpul kunci yang memiliki derajat tinggi dapat memengaruhi kestabilan keseluruhan jaringan, sehingga strategi penambahan sisi harus selektif untuk menjaga keberlanjutan operasi sistem (Miah, Mattingly, & Hyun, 2023).

Analisis lintasan membantu menentukan rute terbaik berdasarkan bobot sisi, seperti jarak, waktu, atau biaya, dan menjadi alat penting untuk optimasi jaringan. Dalam jaringan transportasi, jalur lintasan yang optimal tidak hanya mengurangi jarak tempuh, tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, termasuk waktu, energi, dan biaya operasional. Pada jaringan komunikasi, lintasan optimal memungkinkan data dikirim melalui rute tercepat atau paling efisien, sementara pada jaringan distribusi energi, lintasan optimal membantu menyeimbangkan beban dan mencegah *overloading* pada beberapa titik krisis (Ngo & Mishra, 2023).

Tujuan penelitian ini adalah menelaah pemanfaatan teori graf dalam pemodelan dan analisis struktur jaringan dengan focus pada konektivitas dan lintasan. Kedua konsep ini dipilih karena merupakan fondasi utama dalam memahami cara kerja jaringan dan efisiensinya. Dengan menelaah literatur terkini dan pendekatan deskriptif analitis, penelitian ini bertujuan memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana konsep konektivitas dan lintasan dapat diterapkan dalam berbagai konteks jaringan, baik jaringan komputer, transportasi maupun jaringan biologis (Liu et al., 2023).

Kajian literatur menunjukkan bahwa konektivitas memastikan keterhubungan jaringan secara menyeluruh, sementara lintasan menentukan jalur

optimal antar simpul. Konsep ini bersifat matematis, tetapi memiliki penerapan praktis yang luas, termasuk transportasi, jaringan computer, distribusi energi, dan jaringan sosial. Literatur juga menekankan pentingnya integrasi antara konektivitas dan lintasan agar sistem jaringan tetap efisien dan adaptif terhadap perubahan kondisi serta yang mungkin terjadi (Gajjar, Jha, Kumar, & Lahiri, 2024).

Manfaat lain dari teori graf adalah kemampuannya dalam memprediksi potensi permasalahan di masa depan. Pemodelan graf memungkinkan simulasi untuk menilai ketahanan jaringan dan merancang rute alternatif agar aliran informasi tetap optimal. Harapan penelitian ini adalah memberikan kontribusi bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya dalam matematika diskrit dan aplikasinya pada pemodelan jaringan. Dengan memahami peran konektivitas dan lintasan, teori graf dapat membantu merancang jaringan yang lebih efisien, andal, dan adaptif terhadap perubahan dinamis dalam berbagai sistem nyata (Xue, Tan, Ma, & Ukkusuri, 2025).

KAJIAN TEORI

Teori graf adalah cabang matematika diskrit yang mempelajari struktur berupa himpunan simpul (*vertices*) dan sisi (*edges*). Graf didefinisikan sebagai pasangan $G = (V, E)$. Dimana V adalah himpunan simpul dan E himpunan sisi yang menghubungkan dua simpul V (Peranginangin, 2024).

Konektivitas adalah sejauh mana simpul dalam graf saling terhubung, graf dikatakan terhubung jika setiap pasangan simpul dapat dihubungkan melalui lintasan. Dalam graf dinamis, konsep *persistent connected components* mempertimbangkan perubahan jaringan namun tetap mempertahankan komponen yang terhubung (Jana, Malama, Narasimhan, & Tacioglu, 2023).

Lintasan adalah urutan simpul yang terhubung melalui sisi. Jenis lintasan mencakup lintasan sederhana, lintasan terpendek, dan lintasan Hamilton. Dalam graf dinamis, lintasan juga mempertimbangkan perubahan bobot sisi seiring waktu (Durand, Watteau, Ghazi, & Botez, 2024). Penerapan teori graf meluas lintas disiplin, dari ilmu komputer, transportasi, jaringan sosial, hingga sistem biologi. Kajian literatur menegaskan relevansi teori graf untuk memahami jaringan kompleks.

METODE (GUNAKAN STYLE SECTION)

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif analitis dengan meninjau literatur terkait teori graf, khususnya pada konsep konektivitas dan lintasan. Data yang digunakan bersumber dari artikel ilmiah, buku teks, dan hasil penelitian lima tahun terakhir yang relevan dengan topik. Analisis dilakukan secara kualitatif dengan menekankan pada interpretasi matematis dan penerapan praktis teori graf.

Focus utama penelitian adalah menelaah keterhubungan (*connectivity*) antar simpul dan pencarian lintasan optimal dalam berbagai bentuk jaringan. Untuk mendukung analisis, digunakan penyajian dalam bentuk tabel dan simulasi sederhana yang menggambarkan hubungan jumlah simpul, jumlah sisi, serta kondisi keterhubungan jaringan. Tabel dipakai untuk merangkum hasil simulasi digunakan untuk menggambarkan bagaimana jalur lintasan optimal dapat ditemukan.

Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan pemahaman konseptual yang mendalam mengenai teori graf tanpa menggunakan data lapangan yang rumit. Dengan demikian, metode ini sesuai dengan kajian berbasis literatur yang berorientasi pada pengembangan teori dan aplikasinya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

ANALISIS STRUKTUR GRAF DASAR

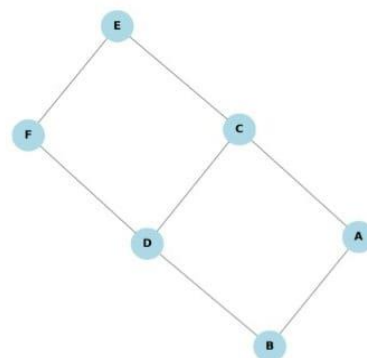
Struktur graf dasar mempresentasikan jaringan dengan simpul sebagai entitas dan sisi sebagai hubungan antar entitas. Dalam konteks teori graf, simpul (*vertex*) dapat diartikan sebagai titik yang mempresentasikan objek atau komponen, sedangkan sisi (*edge*) adalah garis penghubung antar simpul yang menunjukkan adanya relasi atau interaksi. Pada penelitian ini, graf sederhana digunakan untuk memodelkan keterhubungan antar simpul. Dengan pendekatan ini, setiap simpul dapat diasumsikan sebagai titik dalam suatu jaringan, sementara sisi menggambarkan jalur komunikasi, distribusi energi, ataupun rute transportasi yang memungkinkan aliran informasi atau sumber daya.

Graf sederhana dipilih karena dapat mempermudah proses analisis tanpa menimbulkan kompleksitas yang berlebihan. Setiap sisi hanya menghubungkan dua simpul, sehingga tidak terjadi pengulangan jalur maupun loop pada simpul itu

sendiri. Kondisi ini membuat analisis konektivitas menjadi lebih terarah, karena struktur yang ditampilkan benar-benar merefleksikan keterhubungan antar elemen dalam jaringan tanpa adanya bias dari pengulangan sisi.

Pemodelan graf dasar memungkinkan visualisasi struktur jaringan dan memudahkan analisis lanjutan mengenai konektivitas maupun lintasan. Dengan adanya representasi visual, peneliti dapat dengan cepat mengidentifikasi simpul-simpul yang memiliki banyak koneksi (simpul pusat atau *hub*) serta simpul yang berada di posisi perifer dengan jumlah koneksi terbatas. Informasi ini sangat penting karena simpul dengan derajat tinggi biasanya menjadi kunci keberlangsungan jaringan, sementara simpul dengan koneksi rendah lebih rentan terisolasi apabila terjadi gangguan.

Selain itu, struktur dasar juga membuka peluang untuk melakukan berbagai pengukuran kuantitatif, misalnya derajat simpul, jarak rata-rata antar simpul, serta tingkat kepadatan jaringan. Nilai-nilai tersebut dapat digunakan untuk menilai apakah suatu jaringan termasuk efisien, rawan putus, atau memiliki redundansi jalur yang cukup tinggi. Misalnya dalam jaringan transportasi, simpul dapat mewakili kota sedangkan sisi menggambarkan jalan raya yang menghubungkan antar kota. Dengan model graf dasar dapat dianalisis seberapa penting satu jalan tertentu dalam menjaga konektivitas keseluruhan wilayah.



Gambar 1. Graf sederhana dengan 6 simpul dan 7 sisi

Gambar ini menunjukkan bahwa pemilihan sisi strategi sangat penting untuk memastikan konektivitas penuh. Jika salah satu sisi penting di hapus, beberapa simpul akan terisolasi dan jaringan tidak lagi terhubung. Dengan kata lain, graf

sederhana ini menggambarkan konsep kerentanan jaringan. Dalam jaringan komunikasi, misalnya, putusnya satu jalur transmisi utama dapat mengakibatkan sebagian besar perangkat tidak dapat saling terhubung. Demikian pula pada sistem distribusi energi, hilangnya satu saluran listrik dapat menyebabkan pemadaman di beberapa daerah.

Oleh karena itu analisis struktur graf dasar bukan sekedar representasi matematis, tetapi juga berfungsi sebagai alat simulasi untuk memahami perilaku jaringan nyata. Identifikasi simpul dan sisi yang paling berpengaruh menjadi langkah awal dalam merancang sistem yang lebih tangguh, efisiensi, dan berdaya tahan terhadap gangguan.

ANALISIS KONEKTIVITAS JARINGAN

Konektivitas merupakan salah satu aspek paling fundamental dalam teori graf yang berkaitan dengan sejauh mana simpul dalam jaringan dapat saling terhubung. Sebuah graf dikatakan terhubung apabila terdapat lintasan dari setiap simpul ke setiap simpul lainnya. Dalam jaringan nyata konektivitas menggambarkan kemampuan sistem Untuk tetap menjaga hubungan antar komponen baik itu jaringan transportasi, komunikasi, energi, maupun komputer. Tingkat konektivitas yang baik menandakan bahwa sistem tersebut relatif lebih tangguh terhadap gangguan sementara jaringan dengan konektivitas rendah rentan terputus apabila terjadi kegagalan pada salah satu simpul atau sisi.

Dalam penelitian ini, analisis konektivitas dilakukan dengan menghitung jumlah komponen terhubung pada graf. Komponen terhubung merupakan subgraf di mana setiap simpul masih dapat dijangkau dari simpul lain tanpa terputus. Jika graf hanya memiliki satu komponen terhubung, berarti seluruh simpul dalam jaringan saling terhubung secara langsung atau tidak langsung.

Konektivitas ini menjadi ukuran penting untuk menilai seberapa kuat jaringan dalam menghadapi gangguan. Ketika satu atau beberapa sisi dihapus, konektivitas jaringan bisa menurun, yang mengakibatkan sebagian simpul tidak lagi dapat dijangkau. Oleh karena itu, analisis ini membantu memahami sejauh mana struktur jaringan mampu mempertahankan keterhubungannya terhadap perubahan.

Semakin sedikit jumlah komponen terhubung yang dihasilkan, semakin stabil jaringan tersebut.

Sebaliknya, jika jumlah komponen terhubung meningkat, maka jaringan mulai terpecah menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Kondisi ini menunjukkan perlunya perancangan ulang atau penambahan sisi agar jaringan tetap efisien dan tidak mudah terputus.

Tabel 1. Analisis Konektivitas Jaringan

Jumlah Simpul	Jumlah Sisi	Komponen Terhubung	Keterangan
6	7	1	Seluruh simpul saling terhubung
6	5	2	Jaringan terbagi menjadi dua bagian
8	9	1	Jaringan masih terhubung penuh
8	6	3	Beberapa simpul terisolasi

Hasil analisis pada tabel 1 memperlihatkan pola yang jelas: semakin banyak jumlah sisi dibandingkan dengan simpul, semakin besar kemungkinan graf tersebut memiliki komponen terhubung tunggal. misalnya pada graf dengan 6 simpul dan 7 sisi, seluruh simpul dapat saling terhubung sehingga jaringan benar-benar utuh namun ketika jumlah sisi berkurang menjadi 5 jaringan langsung terfragmentasi menjadi dua komponen menandakan adanya simpul yang tidak dapat lagi diakses dari simpul lain.

Secara aplikatif hasil ini dapat dihubungkan dengan berbagai kasus nyata. Dalam jaringan transportasi, konektivitas berarti adanya jalur alternatif yang memastikan setiap kota tetap dapat dijangkau meskipun ada jalan tertentu yang rusak. Dalam sistem komunikasi digital, konektivitas menunjukkan apakah setiap perangkat dapat mengirimkan dan menerima data meskipun sebagian jalur transmisi mengalami gangguan. Sementara itu, dalam distribusi energi, konektivitas menentukan apakah aliran listrik dapat tetap mencapai seluruh konsumen meskipun salah satu saluran utama tidak berfungsi.

Dengan demikian, analisis ini menegaskan bahwa konektivitas jaringan tidak hanya ditentukan oleh jumlah simpul yang ada, meskipun terutama oleh jumlah dan penempatan sisi. Jaringan yang kaya akan sisi cenderung lebih tahan terhadap kegagalan (*fault-tolerant*) sedangkan jaringan dengan sisi terbatas lebih mudah mengalami fragmentasi. Oleh karena itu, perancangan jaringan harus memperhatikan keseimbangan antara jumlah simpul, sisi, serta distribusi keterhubungan agar sistem yang dibangun lebih efisien dan resilien.

ANALISIS LINTASAN OPTIMAL

Lintasan optimal dalam teori graf didefinisikan sebagai jalur dengan bobot minimum yang menghubungkan dua simpul tertentu. Konsep ini sangat penting karena hampir semua sistem jaringan di dunia nyata selalu berusaha mencari jalur yang paling efisien. Dalam jaringan transportasi, lintasan optimal biasanya berarti rute tercepat atau termurah. Pada jaringan komputer lintasan optimal bisa berarti jalur transmisi data yang paling singkat dengan latensi minimal. Sedangkan dalam distribusi energi lintasan optimal adalah jalur yang mampu menyalurkan daya dengan rugi energi paling kecil.

Analisis lintasan dilakukan menggunakan algoritma lintasan terpendek misalnya Dijkstra atau Bellman-ford, untuk menentukan rute dengan bobot total minimum antara pasangan simpul tertentu dengan meningkatnya kepadatan sisi dalam graf semakin banyak pula alternatif lintasan yang bisa dipilih. Hal ini membuat jaringan lebih fleksibel karena tidak bergantung hanya pada satu jalur tunggal.

Tabel 2. Perbandingan Lintasan Terpendek

Pasangan Simpul	Lintasan Terpendek	Bobot Total
A - D	A - B - C	7
A - E	A - C - E	8
B - F	B - D - F	6

Berdasarkan tabel 2 rancangan simpul **A - D** memiliki lintasan terpendek melalui jalur **A - B - D** dengan bobot total 7. Hal ini menunjukkan bahwa simpul B berperan penting sebagai simpul perantara yang menghubungkan A dan D. Jika jalur ini terganggu maka simpul A tidak dapat langsung terhubung ke D kecuali melalui jalur alternatif yang lebih panjang.

Untuk pasangan **A - E**, lintasan optimal yang diperoleh adalah **A - C - E** dengan bobot total 8. Analisis ini memperlihatkan bahwa simpul C berfungsi sebagai simpul transit utama bagi hubungan A menuju E. Keberadaan simpul C menjadi krusial karena tanpa simpul ini jalur alternatif kemungkinan memiliki bobot yang jauh lebih besar.

Sedangkan pada pasangan **B - F** lintasan terpendek ditemukan melalui **B - D - F** dengan bobot 6, yang merupakan bobot terendah diantara semua pasangan yang dianalisis. Hal ini menunjukkan bahwa simpul D berfungsi sebagai simpul penghubung penting yang dapat memfasilitasi komunikasi maupun aliran sumber daya secara efisien antara simpul B dan F.

Hasil analisis lintasan ini menegaskan pentingnya jalur alternatif dalam sebuah jaringan. Jika lintasan utama mengalami kegagalan, ke jaringan masih dapat tetap berfungsi dengan menggunakan lintasan cadangan meskipun bobotnya sedikit lebih besar. Hal ini dikenal dengan konsep redundansi jalur yang merupakan strategi penting dalam perancangan sistem jaringan yang handal.

Secara praktis, penerapan analisis lintasan optimal dapat ditemui pada berbagai bidang. Pada setiap transportasi perkotaan, pemetaan lintasan optimal membantu menentukan rute tercepat untuk menghindari kemacetan. Dalam teknologi komunikasi algoritma lintasan terpendek digunakan untuk meletakkan paket data sehingga transmisi tetap cepat dan stabil. Sementara pada jaringan energi pencarian lintasan optimal membantu memastikan distribusi daya dilakukan dengan rugi energi minimal.

Dengan demikian, lintasan optimal bukan hanya persoalan matematis melainkan strategi yang krusial untuk menciptakan sistem jaringan yang efisien, hemat biaya, dan tahan terhadap gangguan.

SIMULASI PERUBAHAN JARINGAN

Simulasi perubahan jaringan dilakukan untuk menilai sejauh mana struktur graf mampu bertahan ketika salah satu atau beberapa simpul dihapus dari sistem. Pendekatan ini penting karena dalam jaringan nyata kerusakan pada simpul tertentu dapat terjadi akibat faktor teknis, kesalahan operasional, atau bahkan bencana alam. Dengan melakukan simulasi penghapusan simpul, peneliti dapat

mengidentifikasi titik-titik yang paling rentan sekaligus menentukan strategi mitigasi agar jaringan tetap berfungsi meskipun menghadapi gangguan.

Dalam analisis ini penghapusan simpul dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan peran simpul dalam jaringan. Simpul dengan derajat tinggi (*hub node*) umumnya memiliki pengaruh lebih besar terhadap kestabilan jaringan dibandingkan simpul dengan derajat rendah. Oleh karena itu apabila simpul hub terhapus dampaknya akan lebih signifikan karena koneksi yang terbanyak simpul lain ikut terputus.

Tabel 3. Perbandingan Lintasan Terpendek

Simpul Dihapus	Dampak pada Jaringan	Jumlah Komponen Terhubung
C	Jaringan tetap terhubung	1
B	Beberapa simpul terpisah	2
D	Jaringan terpecah besar	3

Berdasarkan tabel 3, dapat dijelaskan bahwa ketika simpul C dihapus, jaringan tetap terhubung dengan jumlah komponen hanya satu. Hal ini menunjukkan bahwa simpul C bukan simpul kritis, sehingga keterhubungan antar simpul lain masih dapat dipertahankan. Kondisi seperti ini mencerminkan bahwa jaringan memiliki redundansi yang baik, artinya ada jalur alternatif yang menghubungkan simpul-simpul meskipun salah satu simpul dihapus.

Namun ketika simpul B dihapus, jaringan mulai menunjukkan kerentanan. Terjadi pemisahan pada beberapa simpul sehingga terbentuk 2 komponen terhubung yang terpisah. Hal ini berarti sebagian simpul tidak lagi dapat menjangkau simpul lainnya. Dalam jaringan transportasi, misalnya, kondisi ini menyerupai skenario di mana satu kota besar (simpul B) terputus dari sistem jalan utama, sehingga beberapa wilayah menjadi terisolasi dan aksesibilitas berkurang.

Kasus paling signifikan terlihat ketika simpul D dihapus penghapusan simpul ini menyebabkan jaringan terpecah besar sehingga terbentuk 3 komponen terhubung yang terpisah. Hal ini mengindikasikan bahwa simpul D merupakan simpul sentral atau hub Node yang berperan sebagai

penghubung utama. Ketika simpul ini hilang konektivitas jaringan rusak secara gratis sehingga banyak simpul lain kehilangan akses. Analisis ini memperlihatkan betapa pentingnya identifikasi simpul-simpul kritis dalam jaringan.

Simulasi ini memberikan gambaran praktis mengenai pentingnya desain jaringan yang tangguh titik pada setiap transportasi, kegagalan simpul sentral dapat menyebabkan kemacetan atau isolasi wilayah tertentu. Dalam jaringan komputer kegagalan node pusat bisa menghambat aliran data ke sebagian besar server atau pengguna. sementara itu, dalam distribusi energi, hilangnya simpul utama dapat mengakibatkan pemadaman besar-besaran karena aliran Energi tidak bisa tersalurkan secara merata.

Hasil dari simulasi dapat disimpulkan bahwa stabilitas jaringan sangat dipengaruhi oleh keberadaan simpul sentral. Oleh karena itu, strategi perancangan jaringan harus memperhatikan keberadaan jalur Cadangan (*backup paths*) dan sistem redundansi. Dengan cara ini meskipun simpul yang telah terganggu atau terhapus jaringan tetap dapat berfungsi dengan baik.

IMPLIKASI TERHADAP JARINGAN NYATA

Dalam jaringan komunikasi, teori graf digunakan untuk mengoptimalkan aliran data melalui kabel, server, dan satelit. Lintasan optimal dalam graf merepresentasikan transmisi data dengan latensi minimum, sehingga pesan dapat sampai ke tujuan dalam waktu tercepat. Apabila terjadi kerusakan node sentral, misalnya server utama yang *down* hasil simulasi penghapusan simpul menunjukkan bahwa konektivitas bisa runtuh. Oleh karena itu, perusahaan penyedia layanan internet menerapkan sistem redundansi misalnya dengan *load balancing* dan *re-rounting* otomatis agar jaringan tetap stabil.

Pada sistem distribusi energi, terutama pada jaringan listrik konektivitas jaringan sangat krusial. Setiap pembangkit listrik dan saluran transmisi dapat dipandang sebagai simpul dalam graf jika salah satu gardu induk yang berperan sebagai simpul hub terganggu maka aliran listrik ke wilayah luas bisa terputus. Hasil simulasi penghapusan simpul pada penelitian ini sejalan dengan fenomena nyata dimana gangguan pada mode utama bisa memicu pemadaman besar-besaran. Dengan menggunakan model graf, perencana jaringan energi dapat

merancang jalur cadangan sehingga sistem tetap beroperasi meskipun terjadi kerusakan pada salah satu simpul utama.

Hasil analisis struktur graf, konektivitas, lintasan optimal, serta simulasi penghapusan simpul memberikan pemahaman yang sangat penting terkait penerapan teori graf dalam dunia nyata. Implikasi tersebut dapat dilihat dari berbagai bidang yang memiliki ketergantungan besar terhadap jaringan, baik berupa transportasi komunikasi, distribusi energi, maupun sistem biologis.

Hasil analisis struktur graf, konektivitas, lintasan optimal, serta simulasi penghapusan simpul memberikan pemahaman yang sangat penting terkait penerapan teori graf dalam dunia nyata. Implikasi tersebut dapat dilihat dari berbagai bidang yang memiliki ketergantungan besar terhadap jaringan, baik berupa transportasi komunikasi, distribusi energi, maupun sistem biologis.

Selain itu, teori graf juga memiliki implikasi besar pada sistem biologis dan kesehatan. Otak manusia, misalnya, dapat direpresentasikan sebagai jaringan kompleks dengan neuron sebagai simpul dan sinaps sebagai sisi. Analisis konektivitas otak memungkinkan peneliti memahami bagaimana gangguan pada neuron yang tertentu dapat menyebabkan penyakit neurodegeneratif seperti Alzheimer atau Parkinson. simulasi penghapusan simpul pada jaringan otak dapat membantu memprediksi dampak kerusakan neuron terhadap fungsi kognitif secara keseluruhan.

Lebih jauh lagi penerapan teori graf terlihat jelas pada jaringan sosial. Individu dalam masyarakat dapat dianggap sebagai simpul, sementara hubungan sosial, pertemanan, atau interaksi komunikasi dianggap sebagai sisi. Analisis lintasan dalam jaringan sosial berguna untuk memahami penyebaran informasi maupun opini publik. misalnya, ketika satu tokoh sentral atau influencer kehilangan akses distribusi informasi bisa terganggu. Hal ini relevan dengan strategi komunikasi publik penyebaran kampanye sosial, hingga pengendalian hoax.

Secara umum, implikasi nyata dari penelitian ini menunjukkan bahwa konektivitas dan lintasan dalam teori graf bukan hanya sekedar konsep matematis melainkan pondasi bagi perancangan sistem yang efisien, tangguh, dan adaptif. Hasil analisis menegaskan bahwa keberadaan simpul

sentral harus diperhatikan secara khusus sebab kerusakan pada simpul tersebut dapat mengakibatkan gangguan besar. Oleh karena itu setiap perancangan jaringan di bidang transportasi, komunikasi, energi, biologi, maupun sosial harus mempertimbangkan mekanisme redundansi, jalur alternatif, serta strategi cadangan yang efektif.

Dengan memahami hal ini, maka teori graf tidak hanya berperan sebagai alat analisis matematika tetapi juga sebagai instrumen penting dalam perancangan dan optimasi sistem kompleks yang menopang kehidupan modern.

PENUTUP

SIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa teori graf memberikan kontribusi signifikan dalam memahami memodelkan, dan mengoptimalkan struktur jaringan. Konsep konektivitas terbukti penting untuk menjamin keterhubungan antar simpul dalam jaringan sehingga fungsi sistem tetap berjalan meskipun terjadi gangguan pada beberapa bagian. Sementara itu, konsep lintasan optimal memberikan dasar untuk menemukan jalur terbaik dengan mempertimbangkan bobot sisi, yang dalam konteks nyata dapat berupa jarak, waktu, atau biaya. Analisis struktur graf dasar, perhitungan konektivitas, pencarian lintasan terpendek, serta simulasi penghapusan simpul menunjukkan bahwa semakin tinggi konektivitas jaringan, semakin besar pula ketahanan sistem terhadap kerusakan. Selain itu, hasil penelitian menegaskan bahwa simpul dengan keterhubungan tinggi (*hub node*) memiliki peran vital dalam menjaga integritas jaringan. Penerapan konsep ini sangat relevan dalam berbagai bidang, seperti transportasi komunikasi distribusi energi, biologi, hingga jejaring sosial, yang seluruhnya memerlukan sistem yang efisien pemanggu, dan adaptif.

SARAN

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan agar teori graf tidak hanya dianalisis pada jaringan sederhana tetapi juga diterapkan pada jaringan kompleks yang lebih realistis misalnya jaringan transportasi antar kota, jaringan listrik nasional, atau jejaring sosial berskala besar. Selain itu, penggunaan algoritma yang lebih canggih seperti Dijkstra, floyd-Warshall, atau Bellman-Ford dapat

dipertimbangkan untuk memperluas analisis lintasan optimal pada berbagai skenario. Simulasi perubahan jaringan juga dapat dikembangkan lebih lanjut dengan memperhitungkan faktor dinamis seperti penambahan atau penghapusan simpul secara acak, sehingga hasil penelitian semakin mendekati kondisi nyata titik untuk keperluan praktis sangat penting juga untuk mengintegrasikan pemodelan graf dengan perangkat lunak atau visualisasi berbasis komputer agar hasil analisis lebih mudah dipahami oleh perencana pengambil keputusan, maupun masyarakat luas. Dengan demikian, teori graf dapat semakin berperan dalam memberikan solusi nyata bagi permasalahan jaringan yang dihadapi di era modern.

DAFTAR PUSTAKA

- Durand, A., Watteau, T., Ghazi, G., & Botez, R. M. (2024). Generalized Shortest Path Problem: An Innovative Approach for Non-Additive Problems in Conditional Weighted Graphs. *Mathematics*, 12(19). <https://doi.org/10.3390/math12192995>
- Gajjar, K., Jha, A. V., Kumar, M., & Lahiri, A. (2024). Reconfiguring Shortest Paths in Graphs. *Algorithmica*, 86(10), 3309–3338. <https://doi.org/10.1007/s00453-024-01263-y>
- Jana, D., Malama, S., Narasimhan, S., & Taciroglu, E. (2023). Edge-based graph neural network for ranking critical road segments in a network. In *PLoS ONE* (Vol. 18). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296045>
- Liu, Y., Lin, Q., Hong, B., Peng, Y., Hjerpe, D., & Liu, X. (2023). Resonance algorithm: an intuitive algorithm to find all shortest paths between two nodes. *Complex and Intelligent Systems*, 9(4), 4159–4167. <https://doi.org/10.1007/s40747-022-00942-z>
- Miah, M. M., Mattingly, S. P., & Hyun, K. K. (2023). Evaluation of Bicycle Network Connectivity Using Graph Theory and Level of Traffic Stress. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 149(9). <https://doi.org/10.1061/jtepbs.teeng-7776>
- Netirith, N., & Ji, M. (2022). Analysis of the Efficiency of Transport Infrastructure Connectivity and Trade. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159613>
- Ngo, H., & Mishra, S. (2023). Traffic Graph Convolutional Network for Dynamic Urban Travel Speed Estimation. *Networks and Spatial Economics*, 23(1), 179–222. <https://doi.org/10.1007/s11067-022-09582-9>
- Peranginangin, A. P. (2024). Analysis of Graph Theory in Transport Network Optimisation: A Mathematical Approach and Its Applications. *Jurnal Educatio*, 10(4), 1431–1439. Retrieved from <https://doi.org/10.31949/educatio.v10i4.10219>
- Xue, J., Tan, R., Ma, J., & Ukkusuri, S. V. (2025). Data Science in Transportation Networks with Graph Neural Networks: A Review and Outlook. *Data Science for Transportation*, 7(2), 1–27. <https://doi.org/10.1007/s42421-025-00124-6>