

Optimisasi Penempatan Sensor *Automatic Weather Station* di Perkebunan Kopi Menggunakan Pendekatan *Metric Dimension* Graf Join

Nurul Maulida Surbakti^{1*}, Dinda Kartika², Zul Amry³, Muhammad Ashari⁴

^{1,2,3,4}Universitas Negeri Medan, Jl. William Iskandar Ps. V, Sumatera Utara, Indonesia

E-mail: ¹nurulmaulida@unimed.ac.id, ²dindakartika@unimed.ac.id, ³zul.amry@unimed.ac.id, ⁴ashari@unimed.ac.id

*Corresponding Author

ABSTRACT

This study aims to analyze the metric dimension of $L_n \vee K_1$ join graph as a mathematical model for optimizing sensor placement in an Internet of Things (IoT)-based Automatic Weather Station (AWS) system in a coffee plantation. This study is motivated by the need for an efficient microclimate monitoring system, with a minimum number of sensors but still capable of providing accurate and continuous environmental information. The methods used include mathematical analysis based on the concept of resolving sets in graph theory to determine the metric dimension value, computational simulation using the Python-based Breadth-First Search (BFS) algorithm to verify the theoretical results, and implementation of an AWS prototype for measuring environmental parameters. The results show that the metric dimension of the $L_n \vee K_1$ graph is $\dim(G) = n$ for every $n \geq 3$, which represents the minimum number of sensors required to uniquely distinguish all monitoring points. The computational simulation results are consistent with the theoretical analysis, thus confirming the validity of the proposed model. The implementation of the AWS prototype in the field shows that this approach is capable of producing efficient sensor distribution while providing accurate microclimate data. The main contribution of this research is the development of a sensor placement optimization model based on metric dimension on a $L_n \vee K_1$ join graph integrated with an IoT-based AWS system. Practically, these findings have implications for improving cost efficiency, reducing energy consumption, and enhancing the reliability of environmental monitoring systems. This approach also provides a scalable framework for optimizing sensor placement in various sensor network applications in precision agriculture and environmental monitoring.

Keywords: Automatic Weather Station, Graph Join, Metric Dimension, Sensor Optimization, Resolving Set

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis *metric dimension* dari graf join $L_n \vee K_1$ sebagai model matematis untuk optimisasi penempatan sensor pada sistem *Automatic Weather Station* (AWS) berbasis *Internet of Things* (IoT) di perkebunan kopi. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan sistem pemantauan iklim mikro yang efisien, dengan jumlah sensor minimum namun tetap mampu memberikan informasi lingkungan secara akurat dan berkelanjutan. Metode yang digunakan meliputi analisis matematis berbasis konsep *resolving set* dalam teori graf untuk menentukan nilai *metric dimension*, simulasi komputasi menggunakan algoritma *Breadth-First Search* (BFS) berbasis *Python* untuk memverifikasi hasil teoretis, serta implementasi prototipe AWS untuk pengukuran parameter lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *metric dimension* graf $L_n \vee K_1$ adalah $\dim(G) = n$ untuk setiap $n \geq 3$, yang merepresentasikan jumlah minimum sensor yang diperlukan untuk membedakan seluruh titik pemantauan secara unik. Hasil simulasi komputasi konsisten dengan analisis teoretis, sehingga mengonfirmasi validitas model yang diusulkan. Implementasi prototipe AWS di lapangan menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu menghasilkan distribusi sensor yang efisien sekaligus menyediakan data iklim mikro yang akurat. Kontribusi utama penelitian ini adalah pengembangan model optimisasi penempatan sensor berbasis *metric dimension* pada graf join $L_n \vee K_1$ yang diintegrasikan dengan sistem AWS berbasis IoT. Secara praktis, temuan ini berimplikasi pada peningkatan efisiensi biaya, pengurangan konsumsi energi, serta peningkatan keandalan sistem pemantauan lingkungan. Pendekatan ini juga menyediakan kerangka yang skalabel untuk optimisasi penempatan sensor pada berbagai aplikasi jaringan sensor dalam pertanian presisi dan pemantauan lingkungan.

Kata kunci: Automatic Weather Station, Graf Join, Metric Dimension, Optimisasi Sensor, Resolving Set

Dikirim: Agustus 2025; Diterima: Desember 2025; Dipublikasikan: Maret 2026

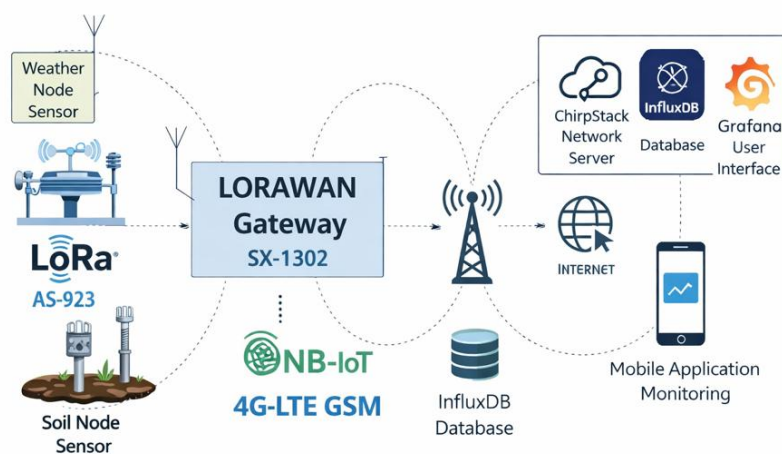
Cara sitasi: Surbakti, N. M., Kartika, D., Amry, Z., & Ashari, M. (2026). Optimisasi Penempatan Sensor Automatic Weather Station di Perkebunan Kopi Menggunakan Pendekatan Metric Dimension Graf Join. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 11(01), 149-162. DOI: <http://dx.doi.org/10.25157/teorema.v11i1.20971>.

This is an open access article under the [CC-BY-SA](#) license



PENDAHULUAN

Pertanian presisi merupakan pendekatan modern dalam pengelolaan lahan pertanian yang memanfaatkan teknologi digital, data lingkungan, serta analisis ilmiah untuk meningkatkan efisiensi produksi sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya alam (Padhiary *et al.*, 2024). Melalui pendekatan ini, petani dapat memantau kondisi lingkungan seperti suhu udara, kelembapan, curah hujan, serta kondisi tanah secara *real-time* sehingga keputusan terkait irigasi, pemupukan, dan pengendalian hama dapat dilakukan secara lebih tepat dan berbasis data (Aijaz *et al.*, 2025; Kumar *et al.*, 2024). Salah satu perangkat utama yang mendukung sistem pertanian presisi adalah *Automatic Weather Station* (AWS), yaitu stasiun cuaca otomatis yang mampu melakukan pengukuran berbagai parameter iklim secara kontinu. AWS yang terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pengiriman data secara nirkabel ke pusat pengolahan informasi sehingga pengguna dapat memantau kondisi lingkungan secara jarak jauh dan berkelanjutan (Loannou *et al.*, 2021; Soussi *et al.*, 2024).



Gambar 1. Jaringan Sensor IoT Berbasis LoRa-GSM

Gambar 1 menunjukkan arsitektur jaringan sensor IoT yang digunakan dalam sistem pemantauan cuaca berbasis AWS. Pada sistem ini, sensor cuaca dan sensor tanah berfungsi sebagai node penginderaan yang mengukur parameter lingkungan secara periodik. Data dari sensor kemudian dikirimkan melalui komunikasi LoRa (*Long Range*) menuju LoRaWAN gateway yang berfungsi sebagai penghubung antara jaringan sensor lokal dengan jaringan internet. Selanjutnya gateway meneruskan data melalui jaringan NB-IoT atau 4G-LTE GSM ke *server cloud* untuk diproses dan disimpan dalam basis data. Platform ChirpStack digunakan sebagai *network server* untuk pengelolaan perangkat dan transmisi data, sedangkan InfluxDB berfungsi sebagai basis data *time-series* dan Grafana digunakan untuk visualisasi data secara *real-time*. Informasi yang dihasilkan kemudian dapat diakses oleh pengguna melalui aplikasi *mobile* untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan perkebunan kopi. Arsitektur ini memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara berkelanjutan, namun efektivitas sistem sangat dipengaruhi oleh jumlah serta lokasi penempatan sensor pada area perkebunan.

Indonesia merupakan salah satu produsen kopi terbesar di dunia dengan luas perkebunan yang mencapai jutaan hektar dan tersebar pada berbagai kondisi topografi serta iklim mikro. Produksi kopi sangat dipengaruhi oleh variabilitas kondisi lingkungan seperti suhu, curah hujan, dan kelembapan tanah, sehingga pemantauan cuaca yang akurat menjadi faktor penting dalam menjaga kualitas dan kuantitas hasil panen (Urugo *et al.*, 2025). Namun demikian, implementasi AWS di lapangan menghadapi tantangan utama terkait penentuan jumlah dan lokasi sensor yang optimal dalam suatu area perkebunan (Al Kez *et al.*, 2022; Al-nabi *et al.*, 2024). Penempatan sensor yang tidak terencana dapat menyebabkan redundansi data pada beberapa area sekaligus kekurangan data

pada area lainnya, sehingga menurunkan efektivitas sistem pemantauan serta meningkatkan biaya investasi perangkat (Chaudhari *et al.*, 2024; da Costa *et al.*, 2024).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji pengembangan jaringan sensor nirkabel untuk pemantauan lingkungan. Teknologi *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) seperti LoRa banyak digunakan karena memiliki jangkauan komunikasi yang luas dengan konsumsi daya yang rendah (Khalifeh *et al.*, 2025). Selain itu, penelitian mengenai *Wireless Sensor Network* (WSN) juga telah dilakukan untuk merancang berbagai konfigurasi jaringan sensor pada sistem pemantauan lingkungan (Miptahudin *et al.*, 2022). Beberapa studi lain memanfaatkan pendekatan teori graf untuk menentukan lokasi optimal sensor dalam berbagai sistem pemantauan, seperti pemantauan gedung, sistem keamanan, maupun jaringan distribusi (Menapace *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2025). Penelitian lainnya juga berfokus pada pengembangan AWS berbasis IoT untuk meningkatkan akurasi pengamatan cuaca secara *real-time* (Ngwenya *et al.*, 2025; Yuliani *et al.*, 2025).

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih menitikberatkan pada aspek pengembangan teknologi jaringan atau analisis matematis secara terpisah. Penelitian mengenai penentuan jumlah minimum dan posisi optimal sensor menggunakan pendekatan matematis yang terstruktur dan diintegrasikan dengan sistem AWS berbasis IoT masih relatif terbatas, khususnya pada aplikasi di sektor perkebunan. Selain itu, penggunaan konsep *metric dimension* dalam teori graf untuk perencanaan penempatan sensor pada sistem pemantauan cuaca berbasis IoT di perkebunan kopi belum banyak dikaji dalam literatur ilmiah. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang membuka peluang untuk mengembangkan pendekatan baru yang mampu mengintegrasikan analisis matematis dengan implementasi teknologi sensor secara aplikatif.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan berbasis *metric dimension* dalam teori graf, khususnya pada struktur *join graph* antara *ladder graph* dan *trivial graph* (Kartika *et al.*, 2023). Konsep *metric dimension* digunakan untuk menentukan *resolving set*, yaitu himpunan simpul acuan minimum yang mampu membedakan semua simpul lain dalam graf berdasarkan jarak (Girisha *et al.*, 2023). Dalam konteks sistem AWS, setiap simpul pada graf merepresentasikan lokasi potensial penempatan sensor, sedangkan simpul pada *trivial graph* merepresentasikan *gateway* atau pusat pengumpulan data. Pendekatan ini memungkinkan penentuan jumlah minimum sensor yang diperlukan sekaligus lokasi penempatannya secara matematis sehingga sistem pemantauan dapat berjalan secara efisien.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengembangkan model matematis berbasis teori graf untuk menentukan jumlah dan posisi optimal sensor AWS di perkebunan kopi; (2) menyusun representasi graf *join* antara *ladder graph* dan *trivial graph* yang merepresentasikan sistem monitoring AWS; (3) menentukan nilai *metric dimension* dari graf tersebut sebagai dasar perencanaan penempatan sensor; (4) mengimplementasikan model ini dalam bentuk prototipe AWS berbasis IoT yang mampu mengirimkan data cuaca secara *real-time*; serta (5) mengintegrasikan hasil model ke dalam aplikasi *mobile* yang dapat memberikan informasi kondisi lingkungan untuk mendukung pengambilan keputusan agronomis.

Kebaruan utama penelitian ini adalah integrasi pendekatan teori graf berbasis *metric dimension* dengan implementasi sistem *Automatic Weather Station* berbasis komunikasi IoT LoRa–GSM untuk menentukan jumlah minimum dan posisi optimal sensor pemantauan cuaca pada perkebunan kopi secara matematis dan aplikatif. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan perangkat sensor, memperbaiki kualitas data pemantauan lingkungan, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam pengelolaan perkebunan kopi. Selain itu, kerangka metode yang dihasilkan berpotensi untuk diadaptasi pada berbagai bidang lain yang memerlukan optimasi penempatan sensor, seperti pemantauan lingkungan, pengelolaan sumber daya air, dan sistem keamanan berbasis jaringan sensor.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas jaringan sensor dan teori graf, masih sangat terbatas penelitian yang mengintegrasikan analisis *metric dimension* dengan sistem *Automatic Weather Station* berbasis *Internet of Things* untuk optimasi penempatan sensor secara aplikatif. Oleh

karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengusulkan model berbasis teori graf yang tidak hanya kuat secara matematis, tetapi juga dapat diimplementasikan pada sistem pemantauan lingkungan di perkebunan kopi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian teoritik dan komputasional bersifat kuantitatif, yang dilaksanakan dengan pendekatan matematika diskrit, khususnya teori graf, untuk menganalisis optimasi penempatan sensor pada sistem *Automatic Weather Station* (AWS) (Kusumastuti & Fran, 2022; Fran *et al.*, 2021). Fokus utama penelitian adalah menentukan *metric dimension* dari graf join $L_n \vee K_1$ sebagai model matematis untuk sistem penempatan sensor AWS pada lahan perkebunan kopi.

Model graf dibangun dari *ladder graph* L_n dan *trivial graph* K_1 . *Ladder graph* L_n merepresentasikan dua jalur paralel lokasi penempatan sensor pada lahan perkebunan kopi yang tersusun secara teratur mengikuti barisan tanaman atau jalur pemantauan. Setiap simpul pada *ladder graph* melambangkan titik potensial penempatan sensor lingkungan, seperti sensor suhu, kelembapan, atau curah hujan.

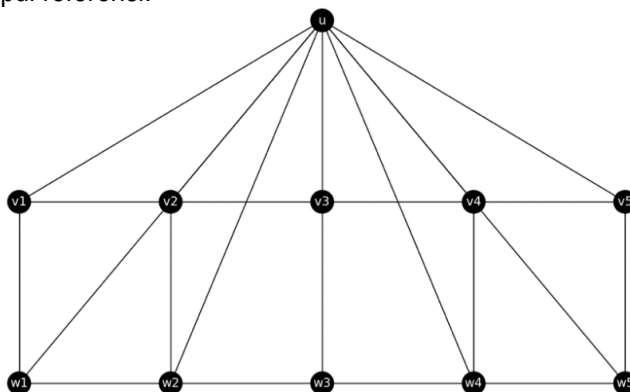
Sementara itu, *trivial graph* K_1 merepresentasikan *gateway* AWS, yaitu perangkat pusat yang mengumpulkan data dari seluruh sensor dan mengirimkannya ke server melalui jaringan komunikasi. Operasi join $L_n \vee K_1$ menghubungkan setiap simpul pada *ladder graph* dengan simpul pusat pada *trivial graph*, sehingga membentuk jaringan sensor yang seluruh node-nya terhubung langsung dengan *gateway*. Dengan demikian, pemetaan model graf terhadap sistem nyata dijelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Pemetaan Model Graf terhadap Sistem Nyata

Elemen Graf	Representasi Sistem AWS
Simpul pada L_n	Lokasi potensial sensor di perkebunan
Sisi pada L_n	Kedekatan spasial antar lokasi sensor
Simpul pada K_1	Gateway atau pusat pengumpulan data
Operasi join	Koneksi komunikasi antara sensor dan gateway

Model graf yang digunakan tidak hanya merepresentasikan struktur abstrak, tetapi juga mencerminkan kondisi nyata di lapangan. *Ladder graph* menggambarkan pola barisan tanaman atau jalur pemantauan yang umum ditemukan pada perkebunan kopi, sedangkan simpul pusat pada *trivial graph* merepresentasikan *gateway* yang berfungsi sebagai pusat komunikasi data. Dengan adanya operasi join, seluruh sensor memiliki koneksi langsung ke *gateway*, yang mencerminkan arsitektur jaringan sensor berbasis IoT. Oleh karena itu, analisis *metric dimension* pada graf ini secara langsung berkaitan dengan efisiensi jumlah dan distribusi sensor dalam sistem pemantauan lingkungan nyata.

Pendekatan ini memungkinkan analisis matematis terhadap jumlah minimum sensor yang diperlukan untuk membedakan seluruh lokasi pemantauan berdasarkan representasi jaraknya terhadap sejumlah simpul referensi.



Gambar 2. Model graf join $L_5 \vee K_1$ sebagai representasi jaringan AWS

Berdasarkan Gambar 2, dua jalur horizontal merepresentasikan barisan lokasi sensor pada lahan, sedangkan simpul pusat di bagian atas melambangkan *gateway* AWS. Seluruh simpul pada *ladder graph* terhubung dengan simpul pusat melalui operasi join, yang menggambarkan konektivitas jaringan sensor menuju sistem pemantauan pusat.

Subjek penelitian adalah seluruh simpul pada graf $L_n \vee K_1$ yang merepresentasikan titik potensial penempatan sensor. Variasi jumlah simpul ditentukan oleh nilai n , yaitu jumlah unit tangga pada *ladder graph*. Dalam penelitian ini dianalisis graf dengan $n \geq 3$. Pengujian implementasi sistem AWS dilakukan di perkebunan kopi Desa Perteguhan, Kabupaten Karo, Sumatera Utara, sebagai studi kasus penerapan model optimasi penempatan sensor.

Penelitian dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu:

1) Perancangan Model Matematis

Tahap pertama adalah membangun model graf yang merepresentasikan sistem penempatan sensor AWS. Langkah-langkah yang dilakukan meliputi:

- Mengidentifikasi struktur graf ladder L_n .
- Menggabungkan graf tersebut dengan *trivial graph* K_1 menggunakan operasi join.
- Menentukan kandidat himpunan simpul yang berpotensi menjadi *resolving set*.
- Menyusun definisi dan lemma yang diperlukan untuk analisis *metric dimension*.

2) Analisis Teoretis *Metric Dimension*

Tahap kedua adalah analisis teoretis untuk menentukan *metric dimension* dari graf $L_n \vee K_1$ melalui pendekatan matematis.

Definisi 1 (Jarak pada Graf)

Misalkan $G = (V, E)$ adalah graf terhubung. Jarak antara dua simpul $u, v \in V$, dinotasikan $d(u, v)$, adalah panjang lintasan terpendek yang menghubungkan u dan v dalam G (Rahmadani & Syafruddin, 2019).

Definisi 2 (*Resolving Set* dan *Metric Dimension*)

Diberikan graf terhubung $G = (V, E)$ dan himpunan terurut $W = \{w_1, w_2, \dots, w_k\} \subseteq V$.

Representasi jarak simpul $v \in V$ terhadap W didefinisikan sebagai:

$$r(v | W) = (d(v, w_1), d(v, w_2), \dots, d(v, w_k))$$

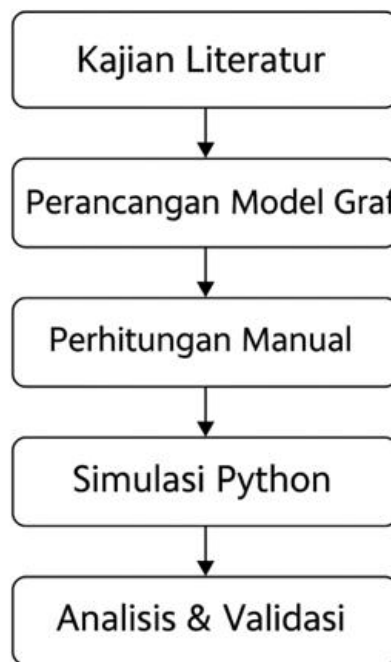
Jika untuk setiap pasangan simpul berbeda $u, v \in V, u \neq v$ berlaku $r(u | W) \neq r(v | W)$, maka himpunan W disebut *resolving set* dari graf G . Kardinalitas minimum dari *resolving set* disebut *metric dimension* dari graf G , yang dinotasikan dengan $\dim(G)$ (Rahmadi et al., 2024).

Lemma 1. Untuk setiap $n \geq 3$, graf join $L_n \vee K_1$ memiliki batas bawah *metric dimension* yang bergantung pada struktur *ladder graph*.

3) Simulasi Komputasional dan Validasi

Proses simulasi dilakukan untuk menentukan *metric dimension* graf $L_n \vee K_1$ secara komputasional. Langkah-langkah algoritma yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Membangun graf $L_n \vee K_1$ menggunakan representasi *adjacency list*.
- Menghitung jarak terpendek antar simpul menggunakan algoritma *Breadth-First Search* (BFS).
- Menghasilkan seluruh kombinasi kandidat *resolving set* dengan ukuran tertentu menggunakan metode kombinatorial.
- Menghitung representasi jarak setiap simpul terhadap kandidat *resolving set*.
- Memeriksa keunikan representasi jarak untuk menentukan apakah himpunan tersebut merupakan *resolving set*.
- Menentukan kardinalitas minimum *resolving set* sebagai nilai *metric dimension* graf.
- Membandingkan hasil simulasi dengan pembuktian teoretis untuk memastikan konsistensi hasil.



Gambar 3. Diagram Alir Metode Penelitian

Diagram alir pada Gambar 3 menunjukkan tahapan penelitian mulai dari pembentukan model graf, analisis teoretis *metric dimension*, hingga validasi melalui simulasi komputer dan implementasi prototipe AWS. Selain analisis matematis, penelitian ini juga mengembangkan prototipe *Automatic Weather Station* berbasis ESP32 yang dilengkapi dengan sensor suhu, kelembapan, dan kecepatan angin. Data dari sensor dikirimkan menggunakan modul SIM7600C GSM melalui protokol MQTT ke server pemantauan (Harianto *et al.*, 2024). Implementasi ini digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian model matematis dengan kondisi pemantauan lingkungan di lapangan.

Analisis data dilakukan secara kuantitatif menggunakan pendekatan kombinatorial dan logika matematika. Hasil perhitungan manual dibandingkan dengan hasil simulasi komputer untuk memastikan validitas nilai *metric dimension* yang diperoleh. *Resolving set* dengan kardinalitas minimum digunakan sebagai dasar penentuan jumlah minimum sensor serta lokasi optimal penempatan sensor dalam sistem AWS.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Matematis

Misalkan graf $L_n \vee K_1$ memiliki himpunan simpul: $V(G) = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \cup \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \cup \{w\}$ dengan u_i dan v_i masing-masing merepresentasikan simpul pada dua jalur paralel *ladder graph*, serta w merupakan simpul pusat pada *trivial graph*. Berdasarkan analisis graf, diperoleh hasil utama berikut.

Teorema 1. Untuk setiap bilangan bulat $n \geq 3$, *metric dimension* dari graf $L_n \vee K_1$ adalah n .

Bukti:

Pembuktian Teorema 1 berlandaskan Definisi 2 mengenai *resolving set* dan representasi jarak simpul terhadap himpunan pembeda W , yang menjadi kerangka formal analisis *metric dimension*.

Langkah 1. Batas Bawah ($\dim(G) \geq n$)

Misalkan terdapat *resolving set* S dengan $|S| \leq n - 1$. Karena L_n bersifat simetris, terdapat sedikitnya satu pasangan simpul (u_k, v_k) yang keduanya tidak berada di S . Bagi setiap $s \in S$,

jarak $d(u_k, s) = d(v_k, s)$, sehingga pasangan ini tidak terbedakan oleh S . Hal ini bertentangan dengan definisi *resolving set*, sehingga $\dim(G) \geq n$.

Langkah 2. Batas Atas ($\dim(G) \leq n$)

Ambil:

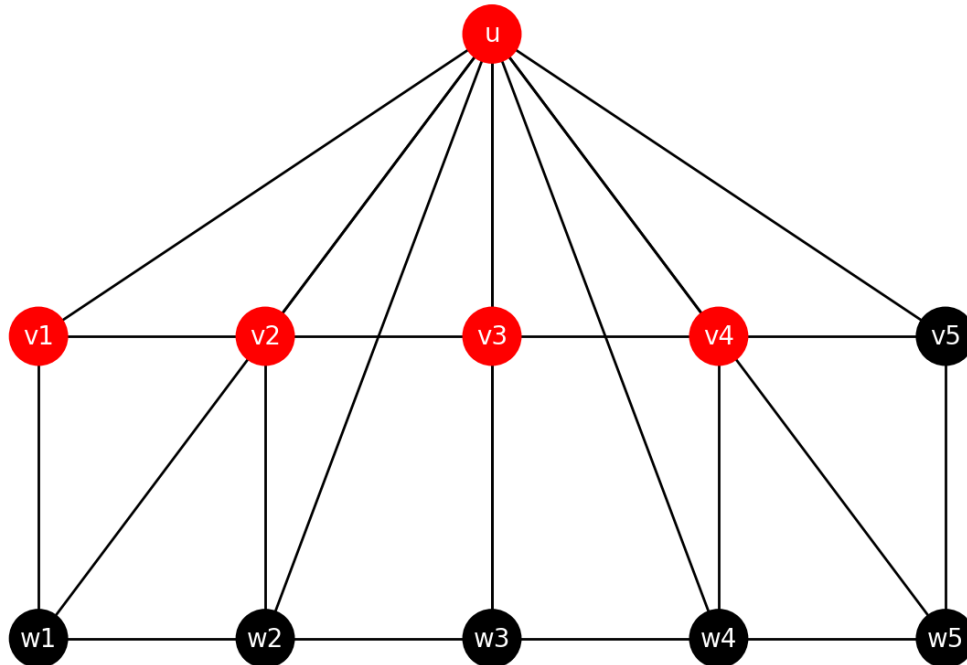
$$W = \{w, u_1, u_2, \dots, u_{n-1}\}$$

Sehingga $|W| = n$

Kita tunjukkan setiap simpul $V(G)$ memiliki vektor representasi jarak unik terhadap W .

Tabel 2. Representasi Jarak Simpul terhadap W pada $L_n \vee K_1$.

Representasi jarak simpul	
$r(u W) = (0, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{n-1})$	
Untuk sembarang simpul $v_i, 1 \leq i \leq n$,	
$r(v_i W) = (1, \underbrace{a_1, a_2, \dots, a_{n-2}}_{n-2}, a_n)$; dengan $a_j =$	$\begin{cases} 0 & \text{jika } j = i \text{ dan } v_i \in W \\ 1 & \text{jika } i - j = 1 \\ 2 & \text{jika } i - j > 1 \end{cases}$,
untuk $j \in \{1, 2, \dots, n-2, n\}$	
Untuk sembarang simpul $w_i, 1 \leq i \leq n$,	
$r(w_i W) = (1, \underbrace{b_1, b_2, \dots, b_{n-2}}_{n-2}, b_n)$; dengan $b_j =$	$\begin{cases} 1 & \text{jika } j = i \text{ dan } v_j \in W \\ 2 & \text{jika } j \neq i \text{ dan } v_j \in W \end{cases}$,
$j \in \{1, 2, \dots, n-2, n\}$	



Gambar 4. Struktur Graf $L_5 \vee K_1$ dengan Simpul Merah sebagai *Resolving Set*

Berdasarkan Gambar 4, simpul yang ditandai dengan warna merah merepresentasikan *resolving set* yang dipilih. Distribusi simpul tersebut menunjukkan bahwa setiap bagian struktur *ladder graph* diwakili oleh satu simpul referensi, sehingga seluruh simpul dalam graf memiliki representasi jarak yang unik. Secara visual, gambar ini memperjelas bagaimana *resolving set* mampu membedakan simpul-simpul yang memiliki posisi simetris, khususnya pasangan simpul pada dua jalur paralel.

Kasus:

1. w unik karena satu-satunya simpul dengan jarak 0 ke dirinya.
2. u_i unik karena memiliki tepat satu koordinat 0 (posisi ke- i pada W).
3. u_n unik karena semua koordinatnya > 0 kecuali koordinat pertama.
4. v_i unik karena semua koordinatnya minimal 1 lebih besar dibanding u_i pada posisi yang sama.

Dengan demikian, W membedakan semua simpul, sehingga $\dim(G) \leq n$.

Langkah 3. Kesimpulan

Dari langkah 1 dan 2, $\dim(G) \geq n$ dan $\dim(G) \leq n$, maka:

$$\dim(L_n \vee K_1) = n.$$

Hasil $\dim(G) = n$ memiliki implikasi langsung dalam sistem AWS, yaitu jumlah minimum sensor yang diperlukan untuk membedakan seluruh titik pemantauan adalah sebanyak n buah. Setiap simpul dalam *resolving set* merepresentasikan lokasi strategis penempatan sensor, sehingga distribusi sensor tidak perlu mencakup seluruh titik, melainkan cukup pada titik-titik tertentu yang mampu membedakan seluruh area pengamatan. Dengan demikian, pendekatan ini memungkinkan pengurangan jumlah sensor tanpa mengurangi kualitas informasi yang diperoleh.

2. Hasil Simulasi dan Komputasi

Simulasi *Python* dilakukan untuk memverifikasi hasil teoretis.

Tabel 3. Hasil *Metric Dimension* dari Simulasi

n	Total Simpul	$\dim(G)$	Waktu Komputasi (detik)
3	7	3	0,001
4	9	4	0,002
5	11	5	0,004
6	13	6	0,007
7	15	7	0,011
8	17	8	0,017
9	19	9	0,024
10	21	10	0,032

Hasil konsisten dengan teorema, memperkuat validitas metode.

3. Implementasi Lapangan Prototipe AWS

Pengujian lapangan dilakukan di perkebunan kopi menggunakan prototipe AWS berbasis ESP32.

A1	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Waktu	Status	Catatan	Descript	Bulu	Feels Like	Min	Max	Kelambapan	Tekanan	Angin	Wind Dir	Asah Angin	Cloud
2	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 23:19:40	Hujan	Hujan Ringan	18,87	19,37	18,87	18,87	98	1014	1,22	103	Solatan	
3	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 23:50:50	Hujan	Hujan Ringan	18,96	19,44	18,96	18,96	97	1014	1,14	108	Solatan	
4	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 00:53:07	Hujan	Hujan Sedang	18,69	19,12	18,69	18,69	96	1013	1,19	212	Barat Daya	
5	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 01:55:25	Hujan	Hujan Ringan	17,83	18,23	17,83	17,83	98	1012	0,24	168	Solatan	
6	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 02:57:42	Hujan	Hujan Ringan	17,48	17,84	17,48	17,48	98	1012	1,32	122	Tenggara	
7	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 03:44:26	Hujan	Hujan Ringan	16,84	17,14	16,84	16,84	98	1012	1,26	120	Tenggara	
8	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 04:46:44	Berawan	Awan Mendung 85-100%	16,25	16,46	16,25	16,25	97	1012	1,37	164	Solatan	
9	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 05:49:01	Berawan	Awan Mendung 85-100%	16,24	16,43	16,24	16,24	96	1013	1,9	172	Solatan	
10	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 06:51:18	Berawan	Awan Mendung 85-100%	16,34	16,48	16,34	16,34	94	1013	1,96	185	Solatan	
11	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 07:53:39	Berawan	Awan Mendung 85-100%	17,67	17,92	17,67	17,67	93	1013	1,62	207	Barat Daya	
12	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 08:56:00	Berawan	Awan Mendung 85-100%	21,45	21,71	21,45	21,45	79	1013	1,62	211	Barat Daya	
13	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 09:58:23	Berawan	Awan Mendung 85-100%	24,64	24,83	24,64	24,64	64	1013	0,94	240	Barat Daya	
14	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 10:45:09	Berawan	Awan Mendung 85-100%	26,02	26,02	26,02	26,02	58	1012	0,98	272	Barat	
15	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 11:47:27	Berawan	Awan Mendung 85-100%	26,72	27,38	26,72	26,72	54	1012	1,4	265	Barat	
16	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 12:49:51	Berawan	Awan Mendung 85-100%	26,9	27,56	26,9	26,9	54	1011	1,66	265	Barat	
17	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 13:52:11	Berawan	Awan Mendung 85-100%	26,26	26,26	26,26	26,26	57	1010	1,67	254	Barat	
18	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 14:54:30	Berawan	Awan Mendung 85-100%	24,83	25,01	24,83	24,83	63	1010	1,31	205	Barat	
19	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 15:56:56	Berawan	Awan Mendung 85-100%	24,24	24,52	24,24	24,24	69	1010	0,85	252	Barat	
20	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 16:59:13	Berawan	Awan Mendung 85-100%	23,48	23,87	23,48	23,48	76	1010	0,62	239	Barat Daya	
21	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 17:45:56	Berawan	Awan Mendung 85-100%	21,56	22,02	21,56	21,56	86	1011	0,71	218	Barat Daya	
22	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 18:48:14	Berawan	Awan Mendung 85-100%	19,34	19,71	19,34	19,34	91	1012	0,81	205	Barat Daya	
23	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 19:50:34	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,75	19,11	18,75	18,75	93	1014	0,74	165	Solatan	
24	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 20:52:57	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,63	18,88	18,63	18,63	93	1014	0,9	177	Solatan	
25	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 21:55:19	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,24	18,52	18,24	18,24	92	1015	1,01	170	Solatan	
26	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 22:57:36	Berawan	Awan Mendung 85-100%	17,79	18,11	17,79	17,79	95	1015	1,17	170	Solatan	
27	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	29 May 2025 23:59:54	Hujan	Hujan Sedang	17,8	18,09	17,8	17,8	94	1016	1,15	172	Solatan	
28	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 00:46:37	Berawan	Awan Mendung 85-100%	17,93	18,21	17,93	17,93	93	1014	1,37	177	Solatan	
29	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 01:48:05	Berawan	Awan Mendung 85-100%	17,47	17,75	17,47	17,47	95	1013	1,3	184	Solatan	
30	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 02:51:13	Berawan	Awan Mendung 85-100%	17,16	17,41	17,16	17,16	95	1012	1,14	177	Solatan	
31	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 03:53:32	Berawan	Awan Mendung 85-100%	16,96	17,19	16,96	16,96	95	1012	1,17	174	Solatan	
32	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 04:55:49	Berawan	Awan Mendung 85-100%	16,82	17,04	16,82	16,82	97	1013	0,96	175	Solatan	
33	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 05:58:07	Berawan	Awan Mendung 85-100%	16,76	17,05	16,76	16,76	98	1013	1,12	175	Solatan	
34	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 07:47:13	Berawan	Awan Mendung 85-100%	19,81	20,27	19,81	19,81	93	1014	1,07	182	Solatan	
35	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 08:49:36	Berawan	Awan Mendung 85-100%	22,26	22,46	22,26	22,26	81	1014	0,43	193	Solatan	
36	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 09:51:59	Berawan	Awan Mendung 85-100%	25,07	25,48	25,07	25,07	70	1014	0,29	308	Utara	
37	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 10:54:20	Berawan	Awan Mendung 85-100%	26,09	26,09	26,09	26,09	66	1013	0,37	357	Utara	
38	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 11:56:39	Berawan	Awan Mendung 85-100%	26,25	26,25	26,25	26,25	66	1013	0,62	328	Barat Laut	
39	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 12:58:03	Berawan	Awan Mendung 85-100%	25,42	25,62	25,42	25,42	73	1012	1,2	330	Barat Laut	
40	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 13:45:49	Berawan	Awan Mendung 85-100%	23,99	24,64	23,99	23,99	84	1012	1,15	340	Utara	
41	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 14:48:08	Berawan	Awan Mendung 85-100%	21	21,65	21	21	96	1012	0,26	328	Barat Laut	
42	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 15:50:24	Berawan	Awan Mendung 85-100%	19,91	20,46	19,91	19,91	96	1012	0,39	220	Barat Daya	
43	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 16:52:38	Hujan	Hujan Ringan	20,11	20,63	20,11	20,11	94	1012	0,69	190	Solatan	
44	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 17:54:54	Hujan	Hujan Ringan	19,23	19,72	19,23	19,23	96	1012	0,85	160	Solatan	
45	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 18:57:10	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,47	18,93	18,47	18,47	98	1013	0,69	194	Solatan	
46	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 19:59:28	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,39	18,82	18,39	18,39	87	1014	0,38	231	Barat Daya	
47	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 20:46:13	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,72	19,21	18,72	18,72	98	1015	1,24	8	Utara	
48	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 21:48:32	Hujan	Hujan Ringan	18,84	19,34	18,84	18,84	98	1016	1,53	325	Barat Laut	
49	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 22:50:55	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,36	18,61	18,36	18,36	97	1016	1,12	304	Barat Laut	
50	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	30 May 2025 23:53:14	Berawan	Awan Mendung 85-100%	18,32	18,71	18,32	18,32	96	1016	0,38	259	Barat	
51	28 Desa Porteguhun, Kac. Snt	31 May 2025 00:55:32	Berawan	Awan Mendung 85-100%	17,74	18,05	17,74	17,74	95	1016	0,99	152	Tenggara	

Gambar 5. Tampilan Data Log Cuaca AWS di Google Spreadsheet

Gambar 5 menunjukkan hasil pengiriman data sensor AWS ke *platform* penyimpanan berbasis *cloud*. Visualisasi ini memperlihatkan bahwa sistem mampu mengirimkan data secara kontinu dan *real-time*, yang menjadi syarat penting dalam sistem pemantauan berbasis IoT. Ketersediaan data secara berkala ini mendukung validasi bahwa model penempatan sensor yang diusulkan dapat diterapkan dalam sistem monitoring lingkungan secara operasional.

Tabel 3. Data Cuaca Hasil Pengukuran AWS

Waktu (WIB)	Kondisi Cuaca	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Kecepatan Angin (m/s)	Curah Hujan (mm/jam)
2025-05-28 23.19.40	Hujan	18,87	98	1,22	0,65
2025-05-28 23.50.50	Hujan	18,96	97	1,14	0,49
2025-05-29 00.53.07	Hujan	18,69	96	1,19	2,2
2025-05-29 01.55.25	Hujan	17,83	98	0,24	0,12
2025-05-29 02.57.42	Hujan	17,48	98	1,32	0,26
2025-05-29 03.44.26	Hujan	16,84	98	1,26	0,12
2025-05-29 04.46.44	Berawan	16,25	97	1,37	
2025-05-29 05.49.01	Berawan	16,24	96	1,9	
2025-05-29 06.51.18	Berawan	16,34	94	1,96	
2025-05-29 07.53.39	Berawan	17,67	93	1,82	
2025-05-29 08.56.00	Berawan	21,45	79	1,62	
2025-05-29 09.58.23	Berawan	24,64	64	0,94	
2025-05-29 10.45.09	Berawan	26,02	58	0,98	
2025-05-29 11.47.27	Berawan	26,72	54	1,4	
2025-05-29 12.49.51	Berawan	26,9	54	1,66	
2025-05-29 13.52.11	Berawan	26,26	57	1,67	
2025-05-29 14.54.30	Berawan	24,83	63	1,31	
2025-05-29 15.56.56	Berawan	24,24	69	0,85	
2025-05-29 16.59.13	Berawan	23,48	76	0,62	
2025-05-29 17.45.56	Berawan	21,56	86	0,71	

Waktu (WIB)	Kondisi Cuaca	Suhu (°C)	Kelembapan (%)	Kecepatan Angin (m/s)	Curah Hujan (mm/jam)
2025-05-29 18.48.14	Berawan	19,34	91	0,81	
2025-05-29 19.50.34	Berawan	18,75	93	0,74	
2025-05-29 20.52.57	Berawan	18,63	93	0,9	
2025-05-29 21.55.19	Berawan	18,24	92	1,01	
2025-05-29 22.57.36	Berawan	17,79	95	1,17	
2025-05-29 23.59.54	Hujan	17,8	94	1,15	1,39
2025-05-30 00.46.37	Berawan	17,93	93	1,37	
2025-05-30 01.48.55	Berawan	17,47	95	1,3	
2025-05-30 02.51.13	Berawan	17,16	95	1,14	

Data pengamatan menunjukkan adanya pola perubahan suhu harian yang signifikan, dimana suhu cenderung meningkat dari pagi hingga siang hari dan menurun pada sore hingga malam hari. Pola ini konsisten dengan kondisi cuaca yang diamati, yaitu dominasi kondisi berawan dan hujan pada malam hingga dini hari. Selain itu, kelembapan relatif menunjukkan nilai tinggi pada malam hari dan menurun pada siang hari, yang mengindikasikan adanya hubungan invers dengan suhu udara. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem AWS yang dikembangkan mampu menangkap dinamika iklim mikro secara akurat.



Gambar 6 Prototipe AWS di lapangan

Berdasarkan Gambar 6 memperlihatkan implementasi prototipe AWS di lapangan. Penempatan sensor mengikuti prinsip distribusi yang dihasilkan dari analisis *metric dimension*, dimana sensor ditempatkan pada titik-titik yang mewakili seluruh area pengamatan secara optimal. Hal ini menunjukkan keterkaitan langsung antara model matematis dan implementasi fisik di lapangan.

4. Konsistensi Teori dan Simulasi

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa nilai *metric dimension* sangat dipengaruhi oleh struktur graf dan tingkat simetri antar simpul (Jiang *et al.*, 2021). Namun demikian, berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berfokus pada graf standar atau jaringan abstrak. Penelitian ini mengaitkan hasil tersebut dengan konteks aplikasi nyata pada sistem AWS berbasis IoT. Dengan demikian,

penelitian ini tidak hanya memperluas kajian teoritis mengenai *metric dimension*, tetapi juga memberikan kontribusi dalam bentuk model aplikatif untuk optimasi penempatan sensor di bidang pertanian presisi.

5. Efisiensi Penempatan Sensor

Pendekatan *metric dimension* yang diadopsi dalam penelitian ini memberikan kerangka optimisasi yang lebih efisien dibandingkan metode heuristik tradisional yang sering kali bergantung pada uji coba (*trial-and-error*) atau algoritma pencarian acak. Secara matematis, penentuan *resolving set* minimum memastikan bahwa setiap sensor yang ditempatkan berkontribusi langsung terhadap kemampuan sistem untuk membedakan seluruh titik dalam jaringan. Dengan demikian, jumlah sensor yang dibutuhkan menjadi minimal tanpa mengorbankan akurasi pengukuran. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip efisiensi sumber daya dalam desain jaringan sensor nirkabel, dimana konsumsi energi, biaya perangkat, dan kompleksitas pemeliharaan dapat ditekan secara signifikan (Ketshabetswe *et al.*, 2019). Secara praktis, hasil ini menunjukkan bahwa jumlah sensor yang diperlukan tidak perlu melebihi nilai *metric dimension* yang telah ditentukan, sehingga dapat mengurangi biaya investasi perangkat tanpa mengurangi kemampuan sistem dalam memantau kondisi lingkungan. Hal ini menjadi keunggulan utama dibandingkan pendekatan konvensional yang cenderung menggunakan jumlah sensor berlebih untuk menghindari kehilangan informasi.

6. Aplikasi Lapangan

Implementasi konsep *metric dimension* pada prototipe AWS di perkebunan kopi memperlihatkan kinerja yang memadai untuk keperluan pemantauan iklim mikro. Data yang direkam meliputi parameter meteorologis utama seperti suhu udara, kelembapan relatif, kecepatan angin, dan curah hujan, yang seluruhnya konsisten dengan pola harian yang diharapkan di wilayah tropis. Keberhasilan implementasi ini menunjukkan bahwa model matematis tidak hanya valid secara teoritis, tetapi juga dapat diintegrasikan secara langsung dalam sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) yang beroperasi di lingkungan nyata. Selain itu, penggunaan *metric dimension* memungkinkan distribusi sensor yang efisien, sehingga area liputan dapat dimaksimalkan dengan jumlah perangkat minimal (Afrin *et al.*, 2025).

7. Keterbatasan dan Arah Pengembangan

Meskipun pendekatan ini menawarkan efisiensi tinggi, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, model matematis yang digunakan mengasumsikan kondisi medan yang homogen dan tidak mempertimbangkan hambatan fisik seperti vegetasi lebat atau kontur tanah yang kompleks, yang dalam praktiknya dapat memengaruhi jangkauan sensor. Kedua, model belum mengakomodasi variabilitas cuaca ekstrem yang dapat menyebabkan gangguan sinyal atau kerusakan perangkat. Ketiga, belum ada mekanisme dalam model untuk menangani kegagalan sensor (*sensor failure*) yang dapat menurunkan kemampuan sistem dalam membedakan titik-titik pengamatan. Untuk pengembangan lebih lanjut, integrasi faktor lingkungan dan penerapan algoritma toleransi kesalahan (*fault-tolerant algorithms*) disarankan, sehingga model dapat digunakan pada skenario lapangan yang lebih kompleks dan dinamis.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menentukan bahwa *metric dimension* dari graf $L_n \vee K_1$ untuk setiap $n \geq 3$ adalah n . Hasil ini menunjukkan bahwa jumlah minimum sensor yang diperlukan dalam sistem *Automatic Weather Station* (AWS) untuk membedakan seluruh titik pemantauan secara unik adalah sebanyak n , sehingga memungkinkan perancangan jaringan sensor yang efisien tanpa redundansi. Hasil simulasi komputasi menunjukkan konsistensi dengan analisis teoretis, yang mengonfirmasi validitas model matematis yang dikembangkan. Selain itu, implementasi prototipe AWS di lapangan menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu mendukung pemantauan parameter iklim mikro secara

akurat. Secara teoretis, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan kajian *metric dimension* pada struktur graf join, khususnya $L_n \vee K_1$. Secara praktis, pendekatan yang diusulkan dapat digunakan sebagai dasar dalam optimasi penempatan sensor pada sistem pemantauan berbasis IoT, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi biaya, mengurangi konsumsi energi, serta meningkatkan keandalan sistem pemantauan lingkungan pada pertanian presisi. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain asumsi kondisi lingkungan yang homogen serta belum mempertimbangkan faktor gangguan fisik dan kegagalan sensor dalam jaringan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan model yang lebih adaptif dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan yang dinamis serta integrasi mekanisme toleransi kesalahan untuk meningkatkan *robustness* sistem.

REKOMENDASI

Berdasarkan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa *metric dimension* graf $L_n \vee K_1$ untuk setiap $n \geq 3$ adalah n , diperoleh bahwa jumlah minimum sensor yang diperlukan untuk membedakan seluruh titik pemantauan adalah sebanyak n . Oleh karena itu, rekomendasi utama dari penelitian ini adalah penerapan model berbasis *metric dimension* dalam perencanaan penempatan sensor AWS, sehingga distribusi sensor dapat dilakukan secara optimal tanpa redundansi dan dengan efisiensi biaya yang lebih baik. Sebagai pengembangan lebih lanjut, disarankan untuk mengintegrasikan model ini dengan faktor kondisi lapangan yang lebih kompleks, seperti variasi topografi, hambatan fisik, serta kualitas sinyal komunikasi, sehingga hasil optimasi menjadi lebih adaptif terhadap kondisi nyata. Selain itu, integrasi dengan algoritma optimasi berbasis kecerdasan buatan dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan fleksibilitas sistem dalam skala yang lebih besar. Untuk penelitian selanjutnya, direkomendasikan pengembangan model yang mampu mengakomodasi kegagalan sensor (*fault-tolerant system*) serta pengujian pada berbagai jenis lahan dan kondisi iklim yang berbeda. Hal ini penting untuk memastikan bahwa model yang diusulkan memiliki tingkat keandalan dan generalisasi yang tinggi dalam berbagai skenario aplikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Menyatakan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam kegiatan penelitian yang dilakukan. Penelitian ini didanai oleh Universitas Negeri Medan pada skema Penelitian Dasar (*Batch I*) sesuai dengan Surat Keputusan Rektor Universitas Negeri Medan Nomor: 0194/UN33/KPT/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrin, S., Rafa, S. J., Kabir, M., Farah, T., Alam, M. S. Bin, Lameesa, A., Ahmed, S. F., & Gandomi, A. H. (2025). Industrial Internet of Things: Implementations, challenges, and potential solutions across various industries. *Computers in Industry*, 170, 104317. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2025.104317>.
- Aijaz, N., Lan, H., Raza, T., Yaqub, M., Iqbal, R., & Pathan, M. S. (2025). Artificial intelligence in agriculture: Advancing crop productivity and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 20, 101762. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101762>.
- Al-nabi, N. R. A., Awda, L., Mayyahi, K., Majeed, A. S., & Raheem, A. (2024). Design and Implementation of a Low-cost IoT Smart Weather Station Framework. *Journal of Internet Services and Information Security (JISIS)*, 14(2), 133–144. <https://doi.org/10.58346/JISIS.2024.12.009>.
- Al Kez, D., Foley, A. M., Lavery, D., Del Rio, D. F., & Sovacool, B. (2022). Exploring the sustainability challenges facing digitalization and internet data centers. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133633>.
- Chaudhari, P., Xiao, Y., Cheng, M. M.-C., & Li, T. (2024). Fundamentals, Algorithms, and Technologies of Occupancy Detection for Smart Buildings Using IoT Sensors. *Sensors*, 24(7), 2123.

- <https://doi.org/10.3390/s24072123>.
- da Costa, T. P., da Costa, D. M. B., & Murphy, F. (2024). A systematic review of real-time data monitoring and its potential application to support dynamic life cycle inventories. *Environmental Impact Assessment Review*, 105, 107416. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107416>.
- Fran, F., Kabang, N. K., & Yundari, Y. (2021). Bilangan Kromatik Lokasi pada Graf Total dan Graf Splitting dari Graf Bintang. *Teorema: Teori Dan Riset Matematika*, 6(2), 150–160. <https://doi.org/10.25157/teorema.v6i2.5322>.
- Girisha, A., Rajendra, P., Vijaya Chandra Kumar, U., & Pushpa, S. (2023). On metric dimensions of flower graphs. *Journal of Physics: Conference Series*, 2571(1), 012019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2571/1/012019>.
- Hariato, D., Bintang, H. S., Ardiyanto, A., & Widyawan, V. L. D. (2024). Development and Evaluation of an ESP32-based Temperature and Humidity Control Unit for Textile Storage. *International Journal of Engineering Continuity*, 4(1), 1–19. <https://doi.org/10.58291/ijec.v4i1.309>.
- Jiang, X., Tian, Z., & Li, K. (2021). A Graph-Based Approach for Missing Sensor Data Imputation. *IEEE Sensors Journal*, 21(20), 23133–23144. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3106656>.
- Kartika, D., Febrian, D., & Surbakti, N. M. (2023). The (Strong) Rainbow Connection Number of Join of Ladder and Trivial Graph. *JTAM (Jurnal Teori Dan Aplikasi Matematika)*, 7(1), 208. <https://doi.org/10.31764/jtam.v7i1.11704>.
- Ketshabetswe, L. K., Zungeru, A. M., Mangwala, M., Chuma, J. M., & Sigweni, B. (2019). Communication Protocols for wireless Sensor Networks: A Survey and Comparison. *Heliyon*, 5(5), e01591. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01591>.
- Khalifeh, A., Al-Qaisi, A., Aldahdouh, K., Al-Sit, W. T., Olaimat, A. AL, Alouneh, S., & Darabkh, K. A. (2025). Low Power Wide Area Network (LPWAN) Protocols: Enablers for Future Wireless Networks. *Results in Engineering*, 27, 105866. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105866>.
- Kumar, V., Sharma, K. V., Kedam, N., Patel, A., Kate, T. R., & Rathnayake, U. (2024). A Comprehensive Review on Smart and Sustainable Agriculture Using IoT Technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100487. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100487>.
- Kusumastuti, N., & Fran, F. (2022). Bilangan Invers Dominasi Total Graf Helm Tertutup, Graf Gear, Graf Roda Ganda dan Graf Antiweb-Gear. *Teorema: Teori dan Riset Matematika*, 7(2), 321. <https://doi.org/10.25157/teorema.v7i2.7211>.
- Menapace, A., Zanfei, A., Herrera, M., & Brentan, B. (2024). Graph Neural Networks for Sensor Placement: A Proof of Concept towards a Digital Twin of Water Distribution Systems. *Water*, 16(13), 1835. <https://doi.org/10.3390/w16131835>.
- Miptahudin, A., Suryani, T., & Wirawan, W. (2022). Wireless Sensor Network Based Monitoring System: Implementation, Constraints, and Solution. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 6(4), 778. <https://doi.org/10.30630/joiv.6.4.1530>.
- Ngwenya, B., Paepae, T., & Bokoro, P. N. (2025). Monitoring Ambient Water Quality Using Machine Learning and Lot: A Review and Recommendations for Advancing SDG Indicator 6.3.2. *Journal of Water Process Engineering*, 73, 107664. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107664>.
- Padhiary, M., Saha, D., Kumar, R., Sethi, L. N., & Kumar, A. (2024). Enhancing Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Machine Learning and AI Vision Applications in All-Terrain Vehicle for Farm Automation. *Smart Agricultural Technology*, 8, 100483. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100483>.
- Rahmadani, F., & Syafruddin, S. (2019). Dimensi Metrik Dari Graf Barbel B_{2n}, n ≥ 3. *Jurnal Matematika UNAND*, 4(2), 89–94. <https://doi.org/10.25077/jmu.4.2.89-94.2015>.
- Rahmadi, D., Ramadhani, I. N., Dheana, C. E., & Mustamin, M. A. (2024). Modeling Network Problem using Metric Dimension: Applied Algorithm on Corona Graph. *Mathematical Journal of Modelling and Forecasting*, 2(1), 20–26. <https://doi.org/10.24036/mjmf.v2i1.21>.
- Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trincherro, D., & Fossa, M. (2024). Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*, 24(8), 2647. <https://doi.org/10.3390/s24082647>.

- Sun, Q., Zhang, Y., Li, M., Liu, H., Lu, B., & Li, S. (2025). Low Model-Dependent Sensor Placement Method for Water Distribution Networks Using Adaptive Attributed Graph Clustering. *Journal of Water Process Engineering*, 71, 107358. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107358>.
- Urugo, M. M., Worku, M., Tola, Y. B., & Gemedo, H. F. (2025). Ethiopian Coffee: Production Systems, Geographical Origin Traceability, and European Union Deforestation Regulation Directive Compliance. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101695. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101695>.
- Yuliani, O., Pratama, B. G., Sari, S. N., Surya, E., & Cuaca, P. (2025). Desain dan Implementasi Alat Pemantauan Cuaca Self-Sustain Berbasis IoT untuk Dukungan Data Cuaca Real-Time Design and Implementation of an IoT-Based Self-Sustaining Weather Monitoring Tool for Real-Time Weather Data Support. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri Dan Informasi (ReTII) Ke-20, November*, 60–67.