

Simulasi Propagasi Sinyal Wi-Fi Menggunakan Metode Elemen Hingga pada Ruangan Kompleks dengan Variasi Posisi Router

Simulation of Wi-Fi Signal Propagation Using the Finite Element Method in Complex Rooms with Variations in Router Position

Nadhira Maulida Hayani¹, Harley Dearmanson Girsang², Nur Nabila³, Khairuna Putri Gunawan⁴, Nerissa Patrice Manuella⁵, Maliha Qonita⁶, Aaron August Vincent Soelaiman⁷, Mochamad Tito Julianto⁸, Sri Nurdianti⁹, Mohamad Khoirun Najib^{*10}, Syukri Arif Rafhida¹¹

Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika, IPB University, Bogor, Indonesia

*E-mail : nadhirahayani@apps.ipb.ac.id¹, dearmansonharley@apps.ipb.ac.id²,
nrsearthnabila@apps.ipb.ac.id³, putrikhairuna@apps.ipb.ac.id⁴,
nerissamanuella@apps.ipb.ac.id⁵, malihaqonita@apps.ipb.ac.id⁶,
aaronavsavs123soelaiman@apps.ipb.ac.id⁷, mtjulianto@apps.ipb.ac.id⁸,
nurdianti@apps.ipb.ac.id⁹, mkhoirun@apps.ipb.ac.id^{10*}, syukri85_arif@apps.ipb.ac.id¹¹*

**Corresponding author*

Received 31 January 2026; Revised 16 February 2026; Accepted 22 February 2026

Abstrak - Wi-Fi merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang banyak digunakan untuk mendukung aktivitas sehari-hari, baik di lingkungan rumah maupun perkantoran. Kualitas sinyal Wi-Fi di dalam ruangan sangat dipengaruhi oleh geometri bangunan dan posisi *router*, terutama pada bangunan dengan bentuk kompleks seperti rumah berbentuk L. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun model matematis propagasi sinyal Wi-Fi menggunakan persamaan Helmholtz pada domain dua dimensi, menerapkan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) untuk menyelesaikan model tersebut pada geometri ruangan berbentuk L, serta menganalisis pengaruh variasi posisi *router* terhadap pola distribusi medan listrik dan terbentuknya area pelemahan sinyal (*dead zone*). Data dan parameter yang digunakan meliputi frekuensi Wi-Fi sebesar 2,4 GHz, bilangan gelombang yang dihitung berdasarkan kecepatan cahaya, serta domain komputasi yang direkonstruksi dari denah rumah nyata berbentuk L. Penyelesaian numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak Mathematica dengan pendekatan FEM dan diskritisasi domain menggunakan *mesh* segitiga. Hasil simulasi divisualisasikan dalam skala logaritmik (dB) untuk menggambarkan distribusi intensitas sinyal secara jelas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penempatan *router* di ruang tengah menghasilkan distribusi sinyal yang paling merata dan meminimalkan *dead zone*, sedangkan penempatan di sudut atau ujung ruangan menyebabkan redaman signifikan akibat pemantulan dan difraksi gelombang oleh dinding dan lorong. Penelitian ini menunjukkan bahwa FEM efektif untuk memodelkan propagasi sinyal Wi-Fi pada geometri ruangan kompleks dan dapat digunakan sebagai dasar pengembangan simulasi yang lebih realistis, seperti pemodelan tiga dimensi, variasi material dinding, serta optimasi penempatan *router* pada bangunan nyata.

Kata Kunci - Metode Elemen Hingga; Persamaan Helmholtz; Propagasi Sinyal; Rumah Berbentuk L; Wi-Fi

Abstract - Wi-Fi is a wireless communication technology widely used to support daily activities in both residential and office environments. Indoor Wi-Fi signal quality is strongly influenced by building geometry and router placement, especially in buildings with complex layouts such as L-shaped houses. This study aims to (1) formulate a mathematical model of Wi-Fi signal propagation using the Helmholtz equation on a two-dimensional domain, (2) apply the Finite Element Method (FEM) to solve the model on an L-shaped room geometry, and (3) analyze the

effect of varying router positions on the distribution pattern of the electric field and the formation of signal attenuation areas (dead zones). The data and parameters include a Wi-Fi frequency of 2.4 GHz, a wavenumber computed from the speed of light, and a computational domain reconstructed from the floor plan of a real L-shaped house. Numerical solutions are obtained using Mathematica with an FEM approach and triangular mesh discretization. The simulation results are visualized on a logarithmic scale (dB) to clearly represent signal intensity distribution. The results indicate that placing the router in the central room produces the most uniform signal distribution and minimizes dead zones, whereas placement at corners or ends of the layout leads to significant attenuation due to wave reflection and diffraction by walls and corridors. This study demonstrates that FEM is effective for modeling Wi-Fi signal propagation in complex indoor geometries and can serve as a basis for developing more realistic simulations, including three-dimensional modeling, wall material variation, and router placement optimization in real buildings.

Keywords - Finite Element Method; Helmholtz Equation; L-Shaped House; Signal Propagation; Wi-Fi

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komunikasi nirkabel telah menjadikan Wi-Fi sebagai kebutuhan dasar dalam aktivitas sehari-hari. Teknologi ini memungkinkan perangkat seperti laptop, smartphone, dan komputer terhubung ke jaringan internet tanpa menggunakan kabel, sehingga memberikan fleksibilitas dalam berkomunikasi dan mengakses informasi. Secara prinsip, Wi-Fi bekerja menggunakan gelombang elektromagnetik pada rentang frekuensi gigahertz, khususnya 2,4 GHz dan 5 GHz, yang termasuk dalam kategori gelombang radio [1], [2]. Gelombang elektromagnetik ini memiliki sifat yang serupa dengan gelombang cahaya dan gelombang mikro, hanya berbeda pada frekuensi serta panjang gelombangnya [3].

Sebagai bagian dari gelombang elektromagnetik, perilaku sinyal Wi-Fi dapat dijelaskan melalui kerangka teoritis persamaan Maxwell. Persamaan ini menggambarkan hubungan fundamental antara medan listrik, medan magnet, serta respons medium tempat gelombang merambat. Ketika gelombang diasumsikan memiliki frekuensi tetap dan merambat pada medium yang seragam, persamaan Maxwell dapat direduksi menjadi persamaan Helmholtz [4], [5]. Persamaan Helmholtz banyak digunakan untuk memodelkan fenomena perambatan gelombang pada ranah frekuensi karena mampu merepresentasikan karakteristik gelombang, bilangan gelombang, serta efek interaksi gelombang dengan objek di sekitarnya. Pendekatan ini sangat relevan dalam konteks propagasi Wi-Fi di dalam ruangan mengingat sinyal mengalami pemantulan, difraksi, interferensi, serta atenuasi ketika berinteraksi dengan dinding, perabot, dan struktur bangunan [6].

Untuk menyelesaikan persamaan Helmholtz pada domain ruangan yang memiliki geometri kompleks, diperlukan pendekatan numerik yang kuat dan fleksibel. Metode Elemen Hingga (Finite Element Method) merupakan salah satu metode numerik yang banyak digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial, termasuk pada pemodelan gelombang dan elektromagnetika [7], [8]. Keunggulan FEM terletak pada kemampuannya menangani geometri arbitrer, kondisi batas yang beragam, serta variasi material dalam domain simulasi. Pada masalah gelombang berfrekuensi tinggi (Helmholtz), literatur juga menyoroti isu dispersi numerik dan strategi pengayaan basis (mis. partition of unity/enriched FEM) untuk meningkatkan akurasi pada *mesh* yang wajar [8], [9]. Dalam pemodelan sinyal Wi-Fi, FEM memungkinkan formulasi bentuk lemah persamaan Helmholtz diselesaikan menggunakan pendekatan Galerkin sehingga menghasilkan distribusi medan yang dapat divisualisasikan pada setiap elemen domain [7].

Ketersediaan perangkat lunak komputasi seperti MATLAB, Octave, atau Mathematica semakin memudahkan implementasi FEM untuk simulasi propagasi gelombang. Sebagai contoh, [10] memberikan ilustrasi lengkap mengenai formulasi persamaan Helmholtz, pembuatan *mesh*,

penerapan kondisi batas, hingga implementasi numerik dalam kasus perambatan gelombang Wi-Fi di dalam ruangan. Pendekatan ini sangat bermanfaat untuk memahami bagaimana sinyal merambat, di mana sinyal melemah, serta bagaimana konfigurasi ruangan memengaruhi kualitas penerimaan sinyal.

Pemodelan propagasi gelombang radio di dalam ruangan telah diteliti luas baik melalui pendekatan statistik berbasis pengukuran maupun pendekatan deterministik berbasis solusi persamaan gelombang [11], [12], [13], [14]. Model statistik klasik untuk multipath indoor seperti model Saleh–Valenzuela menjelaskan struktur klaster pantulan dan sebaran tunda pada kanal indoor, yang kemudian menjadi dasar banyak studi kanal ruangan dan desain sistem komunikasi [15]. Survei tutorial Hashemi merangkum karakteristik kanal *indoor*, meliputi path loss, shadowing, fading skala kecil, serta metrik dispersi waktu, dan menegaskan bahwa geometri bangunan, material, dan posisi pemancar–penerima berkontribusi kuat terhadap variasi sinyal [6].

Untuk kebutuhan perencanaan cakupan, studi empiris mengusulkan model rugi lintasan (*path loss*) dan faktor attenuasi dinding/lantai. Seidel dan Rappaport mengembangkan model prediksi path loss 914 MHz pada gedung bertingkat dan menunjukkan pengaruh jumlah lantai/dinding yang dilalui terhadap redaman [16]. Pada pita yang berbeda, Motley dan Keenan juga melaporkan pengukuran cakupan di dalam gedung pada 900 MHz dan 1700 MHz, memperlihatkan bahwa redaman antar-ruang dan antar-lantai dapat mendominasi dibandingkan rugi jarak bebas [17]. Untuk pita ISM 2,4 GHz yang relevan dengan Wi-Fi, karakterisasi kanal dan pengukuran indoor di sekitar 2,4 GHz menunjukkan adanya fluktuasi temporal serta noise/interferensi yang signifikan pada lingkungan nyata [18], [19], [20].

Di sisi deterministik, pemodelan ray tracing, FDTD, dan metode numerik lainnya digunakan untuk memprediksi medan pada geometri kompleks serta mengevaluasi pengaruh difraksi/penetrasi pada elemen bangunan. Sebagai contoh, Zhang dkk. menggabungkan ray tracing dan FDTD untuk menilai propagasi *indoor/outdoor* melalui struktur jendela dan menekankan pentingnya representasi difraksi yang memadai [21]. Tinjauan komprehensif oleh Obeidat dkk. merangkum berbagai model deterministik (mis. FDTD, finite integration, ray tracing) beserta isu material bangunan dan rugi penetrasi, yang relevan untuk memahami keterbatasan asumsi model sederhana [22].

Dalam konteks pemecahan persamaan gelombang, Metode Elemen Hingga (FEM) menjadi pilihan penting karena fleksibel untuk geometri tidak beraturan dan kondisi batas kompleks. Literatur elektromagnetika berbasis FEM, termasuk pengembangan time-domain FEM (TDFEM) dan skema hibrida FE–BI, menunjukkan kemampuan FEM untuk memodelkan gelombang pada domain terbuka maupun domain dengan hambatan internal [23], [24]. Untuk masalah time-harmonic, formulasi FEM untuk persamaan Helmholtz serta teknik penyerapan seperti perfectly matched layer (PML) banyak digunakan untuk meminimalkan refleksi artifisial pada batas komputasi [25], [26].

Berangkat dari penelitian-penelitian tersebut, kontribusi studi ini berada pada pemodelan deterministik time-harmonic berbasis persamaan Helmholtz pada domain dua dimensi yang mengikuti denah rumah berbentuk L, serta analisis sistematis dampak variasi posisi router terhadap distribusi intensitas sinyal dan pembentukan dead zone. Fokus pada geometri rumah bercabang (L-shape) menambah relevansi praktis, karena konfigurasi sudut dan lorong sering memicu pelemahan akibat refleksi dan difraksi di dalam ruangan [6], [22].

Dalam kehidupan sehari-hari, penurunan kualitas sinyal Wi-Fi sering terjadi pada rumah dengan banyak sekat atau bentuk arsitektur yang tidak simetris. Salah satu bentuk yang umum ditemui adalah rumah berbentuk L (L-shape), yang memiliki sudut tajam dan lorong yang menyebabkan sinyal mudah terperangkap atau melemah. Struktur seperti ini menimbulkan banyak area dengan sinyal rendah (*dead zone*), terutama jika *router* ditempatkan di ujung ruangan atau ruang yang tertutup dinding tebal.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memodelkan propagasi sinyal Wi-Fi pada geometri rumah berbentuk L menggunakan persamaan Helmholtz dan metode FEM. Analisis difokuskan pada variasi posisi *router*, sehingga dapat dilihat

bagaimana lokasi sumber memengaruhi penyebaran sinyal di ruangan yang memiliki struktur bercabang dan banyak sekat. Melalui pemodelan ini, diharapkan muncul pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pola propagasi sinyal di ruangan kompleks serta variasi penempatan *router* yang dapat meningkatkan kualitas jaringan Wi-Fi di lingkungan nyata.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Persamaan Helmholtz

Sinyal Wi-Fi dapat dipandang sebagai gelombang elektromagnetik time-harmonic. Dengan asumsi medium homogen dan analisis pada ranah frekuensi, persamaan Maxwell dapat direduksi menjadi bentuk persamaan Helmholtz untuk komponen medan yang dimodelkan [4], [5]. Perilaku perambatannya di dalam ruang kemudian dapat dideskripsikan menggunakan persamaan Helmholtz sebagai berikut [4]:

$$\nabla^2 E + k^2 E = -f(x, y), \forall (x, y) \in \Omega \quad (1)$$

dengan

$E(x, y)$: distribusi medan listrik.

k : bilangan gelombang yang berhubungan dengan frekuensi Wi-Fi

$f(x, y)$: Sumber gelombang (*router* Wi-Fi).

Ω : domain.

Penelitian ini menggunakan kondisi batas Neumann homogen

$$\frac{\partial E}{\partial n} = 0, \forall (x, y) \in \partial\Omega \quad (2)$$

yang diterapkan pada seluruh batas domain. Kondisi ini menyatakan bahwa tidak terdapat aliran gelombang yang melintasi batas domain, sehingga gelombang hanya merambat di dalam ruang bebas dan tidak merambat di dalam dinding.

Secara makna fisik, kondisi batas Neumann homogen pada formulasi Helmholtz menetapkan turunan normal medan pada dinding bernilai nol yaitu $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$. Untuk model skalar ini, syarat tersebut dapat ditafsirkan sebagai dinding pemantul sempurna (*perfectly reflecting boundary*) yang tidak mengizinkan komponen fluks gradien medan menembus batas, sehingga energi gelombang tetap berada di dalam domain komputasi. Pada elektromagnetika, bentuk Neumann homogen sering berkaitan dengan batas *Perfect Magnetic Conductor* (PMC), yaitu kondisi ‘natural’ pada formulasi FEM yang memaksakan komponen medan magnet tangensial nol pada permukaan, dan karenanya memodelkan refleksi tanpa rugi serta tanpa penetrasi material [27], [28]. Interpretasi ini konsisten untuk pendekatan idealisasi dinding pada simulasi 2D: dinding dianggap tidak menyerap dan tidak meneruskan gelombang, sehingga efek utama yang muncul adalah refleksi dan interferensi di dalam ruangan.

2.2. Domain dan Diskritisasi Mesh

Penelitian ini menggunakan model simulasi berbasis domain tunggal dengan geometri kompleks, yaitu denah rumah berbentuk L (*L-shape*). Domain simulasi merupakan domain dua dimensi $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ dengan ukuran total $15 \text{ m} \times 10 \text{ m}$, dengan satuan panjang dinyatakan dalam meter. Domain ini dirancang untuk merepresentasikan kondisi lingkungan dalam ruangan nyata yang terdiri dari ruang tengah, lorong, dan tiga kamar tidur yang dipisahkan oleh dinding penyekat tebal. Denah rumah dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Denah rumah berbentuk L yang digunakan.

Secara matematis, domain simulasi didefinisikan sebagai himpunan $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ yang merupakan gabungan area persegi panjang dikurangi oleh himpunan penghalang (dinding). Dalam penelitian ini, domain Ω merepresentasikan area ruangan yang tidak terhalang oleh dinding, yaitu area tempat gelombang Wi-Fi dapat merambat. Sedangkan, himpunan penghalang merepresentasikan dinding fisik yang dimodelkan sebagai batas area di luar domain propagasi gelombang, sehingga gelombang tidak merambat di dalam dinding dan hanya dihitung pada domain Ω . Formulasi domain dinyatakan sebagai berikut:

$$\Omega = ([0,15] \times [0,3.75] \cup [9.85,15] \times [3.75,10]) \setminus \bigcup_{i=1}^9 w_i \quad (3)$$

dengan w_i merepresentasikan himpunan penghalang dinding yang didefinisikan sebagai berikut:

- $w_1 = [3.3,3.45] \times [0,2.95]$
- $w_2 = [0,2.25] \times [1.0,1.15]$
- $w_3 = [9.85,10.0] \times [0,2.95]$
- $w_4 = [11.4,11.55] \times [0,2.95]$
- $w_5 = [12.35,15.0] \times [5.85,6.0]$
- $w_6 = [11.4,11.55] \times [3.75,5.05]$
- $w_7 = [11.4,15.0] \times [3.75,3.9]$
- $w_8 = [9.85,10.75] \times [2.95,3.1]$
- $w_9 = [11.4,12.75] \times [2.95,3.1]$

Analisis dilakukan dengan memvariasikan posisi *router* di dalam domain Ω tersebut. Hal ini bertujuan untuk membandingkan seberapa kuat sinyal menyebar saat berada di area terbuka (tanpa halangan) dibandingkan saat sinyal harus berinteraksi dengan keberadaan dinding sebagai penghalang propagasi. Setelah domain didefinisikan secara matematis, proses dilanjutkan dengan diskritisasi *mesh* yang meliputi:

1. Membangun batas domain geometris sesuai definisi himpunan Ω beserta seluruh hambatan internal (w_1 hingga w_9).
2. Mengonversi domain menjadi jaring-jaring elemen segitiga (*triangular mesh*).
3. Menentukan ukuran elemen agar memenuhi kriteria stabilitas.

Pada penelitian ini, domain didiskritisasi menggunakan elemen segitiga dengan ukuran elemen maksimum sebesar 0.025 m. Proses ini menghasilkan 5.393 elemen segitiga dan 11.244 node, yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan Helmholtz secara numerik menggunakan Metode Elemen Hingga. Ukuran *mesh* tersebut dipilih untuk memperoleh representasi numerik yang cukup akurat dalam memodelkan propagasi gelombang pada domain simulasi.

Untuk memastikan keakuratan hasil numerik, dilakukan uji konvergensi *mesh* menggunakan beberapa ukuran elemen pada salah satu variasi posisi router sebagai kasus representatif. Berdasarkan hasil pengujian, *mesh* dengan ukuran elemen maksimum 0.025 m dipilih karena memberikan hasil yang stabil dengan efisiensi komputasi yang baik, sehingga digunakan dalam seluruh simulasi.

2.3. Pemodelan sumber Router Wi-Fi

Router Wi-Fi dimodelkan sebagai fungsi Gaussian untuk mewakili sumber gelombang terpusat:

$$f(x, y) = A \exp \left(-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4)$$

dengan A merepresentasikan intensitas sumber, (x_0, y_0) adalah koordinat pusat sumber sinyal Wi-Fi dan σ adalah lebar sebaran Gaussian.

Penelitian ini menetapkan lima variasi posisi *router* yang tersebar di titik-titik strategis domain untuk menganalisis pengaruh lokasi pemancar terhadap pola distribusi sinyal. Kelima posisi tersebut didefinisikan ke dalam koordinat (x, y) sebagai berikut:

Tabel 1. Lima variasi posisi *router*

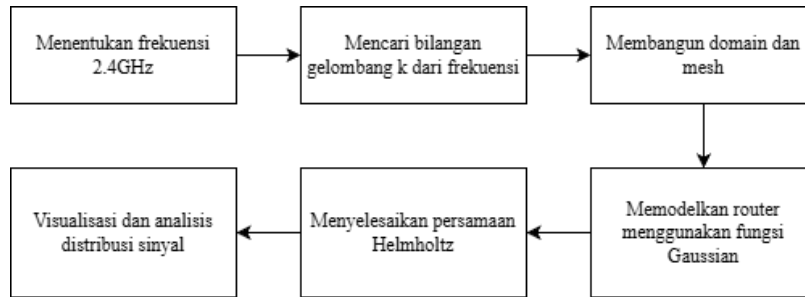
No	Posisi Router	Koordinat	Keterangan
1	Ruang tengah	(7.0 , 3.45)	Posisi sentral dengan hambatan minimal
2	Kamar ujung kiri	(0.1 , 1.9)	Posisi sudut terjauh di sayap kiri bangunan
3	Kamar bawah kanan	(14.0 , 0.1)	Posisi sudut terjauh di sayap kanan bawah
4	Kamar kanan atas	(14.75 , 9.75)	Posisi sudut terjauh di lantai atas
5	Persimpangan lorong	(11 , 4)	Posisi alternatif setelah ruang tengah

2.4. Eksekusi dan visualisasi solusi

Setelah model matematika siap, persamaan Helmholtz diselesaikan secara numerik menggunakan Metode Elemen Hingga berbasis pendekatan Galerkin dengan elemen segitiga linear pada domain dua dimensi. Solver numerik digunakan untuk menghitung distribusi medan listrik pada setiap node *mesh* berdasarkan parameter simulasi yang telah ditentukan. Selanjutnya, proses komputasi dilakukan melalui tahapan sebagai berikut:

1. Mencari nilai intensitas medan listrik atau $E(x, y)$ di setiap titik koordinat dalam domain menggunakan Metode Elemen Hingga.
2. Mengkonversi nilai medan listrik atau $E(x, y)$ ke skala desibel, sehingga menjadi $20 \log_{10} |E| + 10^{-9}$.
3. Menampilkan hasil akhir berupa peta panas (*heatmap*) menggunakan nilai medan gelombang yang telah dikonversi. Warna merah merepresentasikan sinyal kuat (dekat sumber) dan biru merepresentasikan sinyal lemah/mati (*dead zone*).

Diagram alir yang menggabungkan seluruh tahapan metode penelitian disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah formulasi matematis disusun, seluruh variasi disimulasikan menggunakan *software* Mathematica. Sebelum melakukan visualisasi hasil, terlebih dahulu ditentukan nilai frekuensi Wi-Fi yang digunakan. Pada umumnya, *router* Wi-Fi bekerja pada frekuensi 2.4 GHz, sehingga nilai tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan bilangan gelombang. Bilangan gelombang k dihitung menggunakan rumus berikut.

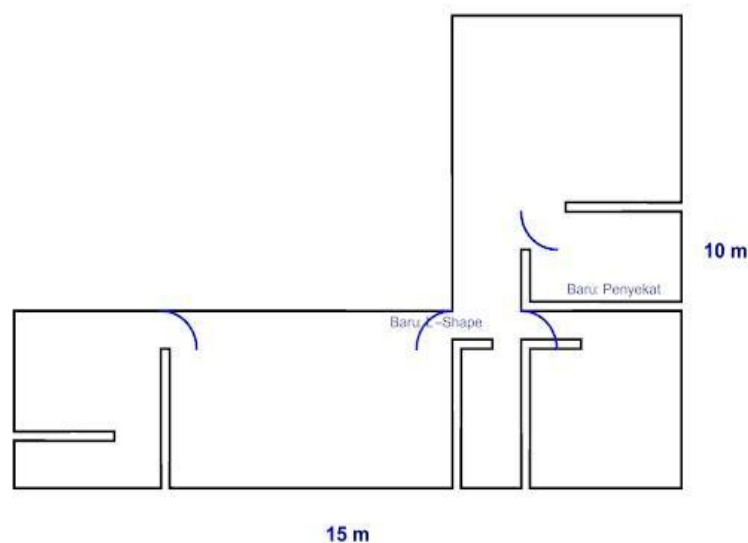
$$k = \frac{2\pi f}{c}, \quad (5)$$

dengan $f = 2,4 \times 10^9 \text{ Hz}$ sebagai frekuensi Wi-Fi dan $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ sebagai kecepatan cahaya, sehingga diperoleh:

$$k = \frac{2\pi(2,4 \cdot 10^9)}{3 \cdot 10^8} = 50,265.$$

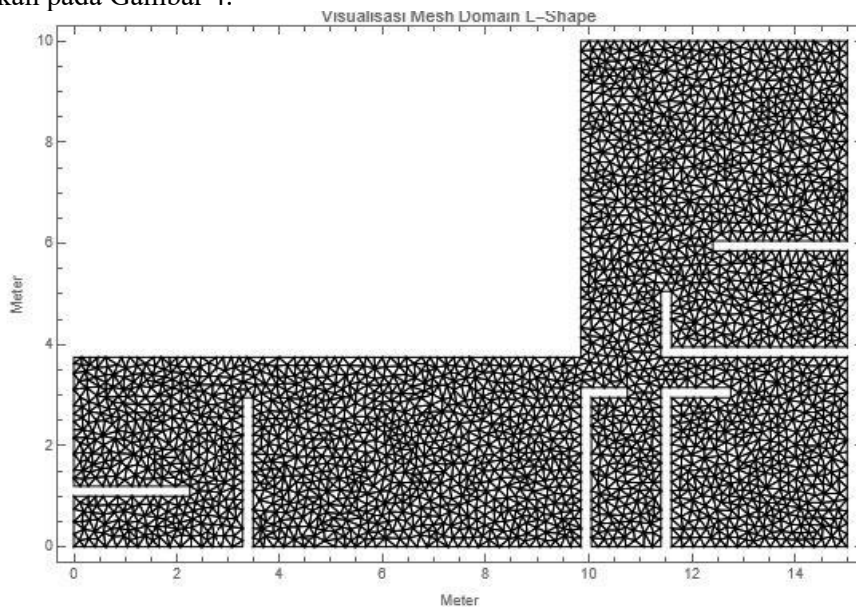
Nilai $k = 50,265$ inilah yang digunakan dalam seluruh simulasi.

Berdasarkan referensi denah pada Gambar 1, geometri tersebut kemudian direkonstruksi menjadi domain komputasi numerik menggunakan perangkat lunak Mathematica. Dinding dan sekat dimodelkan sebagai ruangan tanpa aliran gelombang untuk merepresentasikan kondisi nyata. Hasil pemodelan domain tersebut dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini.



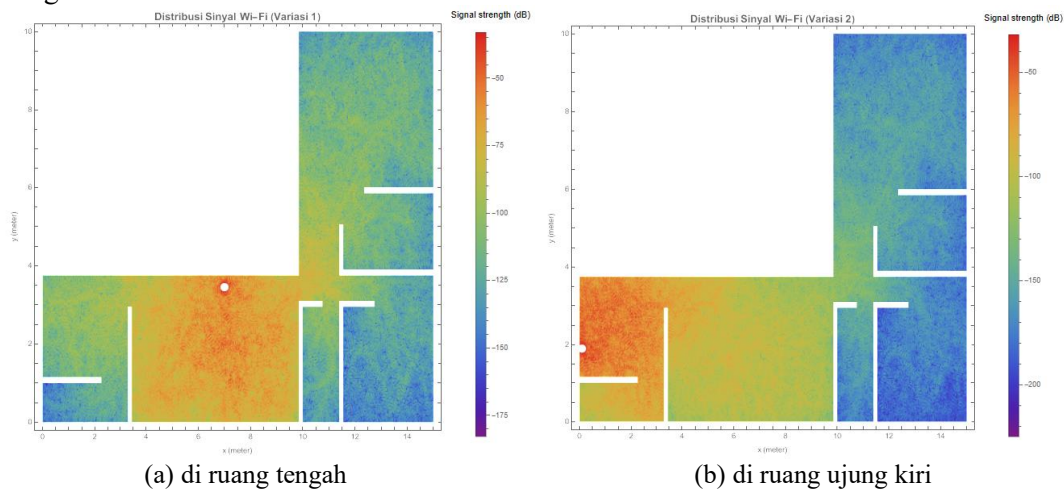
Gambar 3. Denah domain komputasi numerik

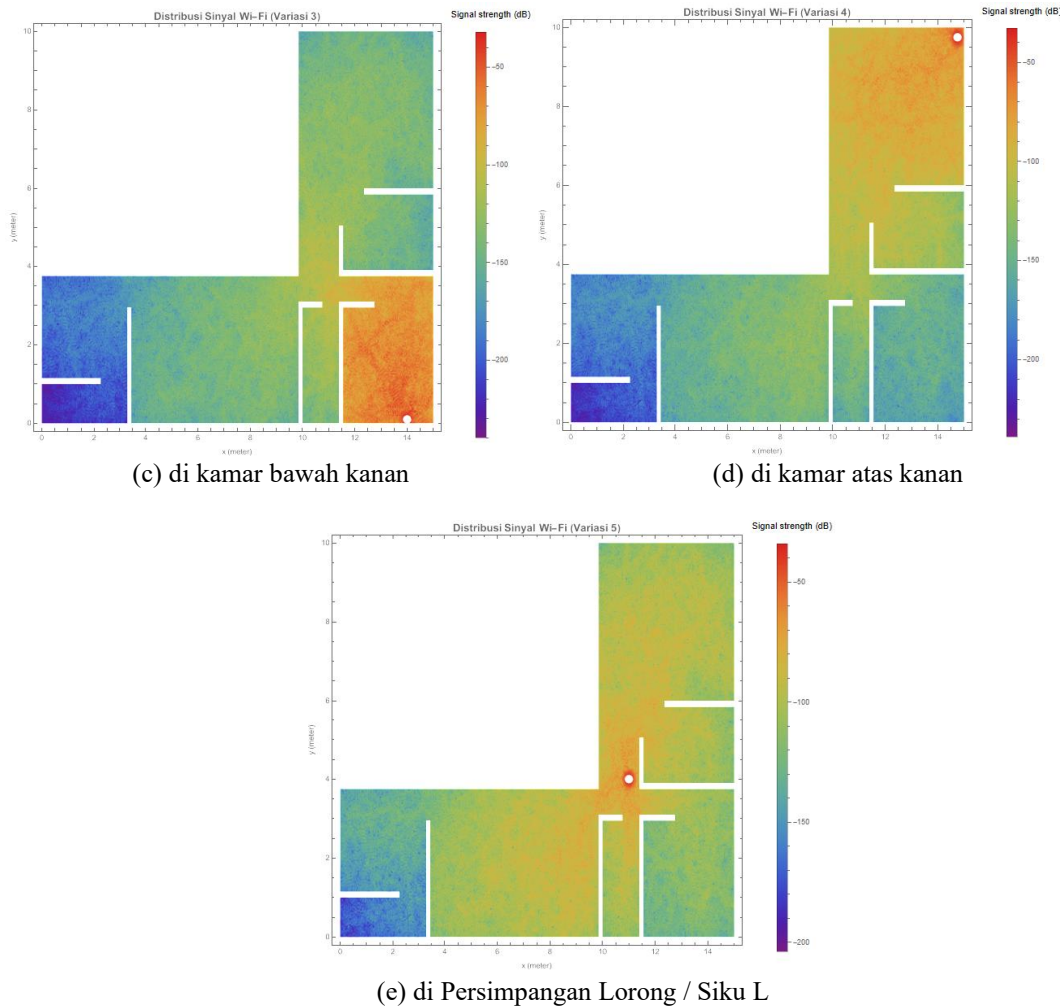
Adapun parameter simulasi yang digunakan meliputi amplitudo sumber $A = 100 \text{ V/m}$ dan lebar Gaussian $\sigma = 0.15 \text{ m}$, yang merepresentasikan karakteristik sumber gelombang Wi-Fi yang terpusat pada posisi *router*. Domain kemudian didiskritisasi menggunakan elemen segitiga untuk memperoleh representasi numerik yang cukup halus. Visualisasi hasil diskritisasi domain ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil diskritisasi domain dengan pengaturan *mesh*

Setelah seluruh parameter simulasi dan domain ditentukan, persamaan Helmholtz diselesaikan secara numerik menggunakan Metode Elemen Hingga. Simulasi dilakukan untuk setiap variasi posisi *router* guna menganalisis pengaruh lokasi sumber terhadap distribusi sinyal di dalam ruangan. Solusi numerik yang diperoleh kemudian divisualisasikan dalam bentuk distribusi intensitas sinyal untuk masing-masing variasi posisi *router*, sebagaimana ditunjukkan pada gambar berikut:





Gambar 5. Visualisasi distribusi sinyal Wi-Fi

3.1. Variasi 1 : Router Diletakkan di Ruang Tengah (7.0 , 3.45)

Visualisasi hasil simulasi menggunakan skala logaritmik (dB) diterapkan untuk mengatasi rentang dinamis amplitudo gelombang elektromagnetik yang sangat lebar. Dalam perambatannya, sinyal Wi-Fi mengalami peluruhan energi secara eksponensial, mengakibatkan perbedaan orde besaran yang ekstrem antara sinyal di dekat sumber (10^0) dengan sinyal di area yang jauh dengan sumber, (10^{-6} atau lebih kecil). Penggunaan skala linier dalam data dengan kesenjangan yang sangat lebar ini akan menyebabkan informasi pada area sinyal lemah tidak dapat teramati secara visual karena nilainya tampak mendekati nol relatif terhadap sumber. Sehingga digunakan skala logaritmik mutlak untuk mengompresi amplitudo agar menampilkan pola distribusi sinyal secara rinci dan proposional. Visualisasi disajikan pada Gambar 5a. Hasil simulasi ditampilkan dalam skala logaritmik (dB) dengan rentang -40 dB sampai -250 dB. Nilai dB yang negatif menunjukkan adanya redaman atau berkurangnya daya sinyal dari sumber. Area sekitar -40 dB berarti sinyal masih kuat dan biasanya terlihat dengan warna terang (merah/kuning). Sebaliknya, nilai mendekati -250 dB menunjukkan sinyal sangat lemah akibat jarak atau hambatan seperti dinding, dan biasanya ditampilkan dengan warna biru gelap.

Pada variasi pertama, router ditempatkan di ruang tengah yang merupakan posisi paling terbuka pada struktur rumah berbentuk L. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sinyal menyebar secara lebih merata dibandingkan variasi penempatan lainnya, karena gelombang memiliki ruang propagasi yang luas sebelum berinteraksi dengan dinding. Intensitas sinyal relatif tinggi pada

sebagian besar area ruangan, pemantulan gelombang tidak menyebabkan terjadinya *trapping* yang signifikan, serta area lorong dan kamar samping masih menerima sinyal dengan intensitas moderat hingga baik.

3.2. Variasi 2 : Router Diletakkan di Kamar Ujung Kiri (0.1 , 1.9)

Pada variasi kedua, *router* ditempatkan di sudut kiri bawah rumah yang merupakan area paling jauh dari ruang terbuka. Visualisasi dilihat pada Gambar 5b. Pola propagasi sinyal menunjukkan bahwa intensitas sinyal relatif tinggi di dalam kamar sumber, namun mengalami pelemahan yang sangat signifikan ketika merambat menuju ruang tengah dan ruangan lainnya. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa sebagian besar energi gelombang terperangkap di dalam kamar asal akibat interaksi berulang dengan dinding. Keberadaan dinding yang tebal serta belokan ruangan yang tajam menyebabkan terjadinya pemantulan berulang dan redaman yang besar, sehingga sinyal sulit menembus area lain. Akibatnya, ruang kamar kanan atas dan kamar bawah kanan hampir tidak menerima sinyal. Kondisi ini menghasilkan banyak area dengan intensitas sinyal rendah (*dead zone*) dan menunjukkan bahwa penempatan *router* di sudut ruangan sangat tidak efisien untuk rumah dengan geometri berbentuk L.

3.3. Variasi 3 : Router Diletakkan di Kamar Bawah Kanan (14.0 , 0.1)

Variasi ini bersifat analog dengan variasi sebelumnya, namun dengan penempatan *router* di sisi berlawanan, yaitu kamar bawah kanan. Visualisasi dilihat pada Gambar 5c. Pola propagasi sinyal menunjukkan bahwa intensitas sinyal relatif tinggi di dalam kamar sumber, namun mengalami pelemahan yang sangat signifikan ketika merambat menuju ruang tengah dan ruangan lainnya. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa sebagian besar energi gelombang terperangkap di dalam kamar asal akibat interaksi berulang dengan dinding. Keberadaan dinding yang tebal serta belokan ruangan yang tajam menyebabkan terjadinya pemantulan berulang dan redaman yang besar, sehingga sinyal sulit menembus area lain. Akibatnya, ruang kamar kanan atas dan kamar bawah kanan hampir tidak menerima sinyal. Kondisi ini menghasilkan banyak area dengan intensitas sinyal rendah (*dead zone*) dan menunjukkan bahwa penempatan *router* di sudut ruangan sangat tidak efisien untuk rumah dengan geometri berbentuk L.

3.4. Variasi 4 : Router Diletakkan di Ruang Kanan Atas (14.75 , 9.75)

Pada variasi keempat, *router* ditempatkan di kamar kanan atas. Visualisasi dapat dilihat pada Gambar 5d. Posisi ini menghasilkan kinerja yang sedikit lebih baik dibandingkan dua variasi sebelumnya yang menempatkan *router* di sudut ruangan, namun masih jauh lebih buruk dibandingkan penempatan di ruang tengah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sinyal masih dapat menjangkau sebagian area ruang tengah, tetapi dengan intensitas yang telah mengalami redaman signifikan. Area di sisi kiri bawah rumah menunjukkan intensitas sinyal yang sangat lemah, sehingga berpotensi membentuk *dead zone*. Selain itu, interaksi gelombang dengan sudut dan dinding pada area perpotongan bentuk L menyebabkan terjadinya interferensi dan pemantulan yang cukup besar, yang semakin memperburuk kualitas propagasi sinyal. Meskipun sinyal tidak sepenuhnya terperangkap di dalam ruang sumber seperti pada variasi kedua dan ketiga, distribusi sinyal tetap tidak merata dan banyak area ruangan yang tidak menerima sinyal secara memadai.

3.5. Variasi 5: Router Diletakkan di Persimpangan Lorong / Siku L (11.0,4.0)

Pada variasi kelima, *router* ditempatkan di titik pertemuan antara lorong horizontal dan vertikal, yaitu pada koordinat siku bangunan berbentuk L. Posisi ini merepresentasikan penempatan *router* di area koridor penghubung antar-ruang. Visualisasi dapat dilihat pada Gambar 5e. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi sinyal pada variasi ini tergolong cukup baik, meskipun belum seoptimal penempatan *router* di ruang tengah. Lorong berperan sebagai pandu gelombang (*waveguide*) yang mengurangi hambatan propagasi, sehingga sinyal dapat merambat dengan kuat dan relatif jauh sepanjang jalur lurus baik secara horizontal maupun vertikal. Namun demikian, intensitas sinyal yang masuk ke dalam kamar-kamar relatif lebih

rendah dibandingkan variasi pertama, karena gelombang yang merambat melalui lorong sempit mengalami kesulitan untuk berbelok masuk ke area privat. Berbeda dengan pola penyebaran radial pada penempatan di ruang tengah, gelombang pada posisi ini harus mengalami difraksi yang tajam saat melewati pintu kamar, yang mengakibatkan terjadinya penurunan daya (*power loss*). Secara keseluruhan, posisi ini dapat dianggap sebagai alternatif terbaik kedua setelah ruang tengah, meskipun masih memiliki keterbatasan dalam hal penetrasi sinyal ke ruang-ruang privat dibandingkan dengan posisi sentral yang terbuka luas.

3.6. Analisis Kuantitatif Distribusi Sinyal

Untuk melengkapi analisis visual, dilakukan evaluasi kuantitatif terhadap distribusi sinyal pada setiap variasi posisi *router* menggunakan tiga metrik, yaitu persentase area yang masih memiliki koneksi Wi-Fi yang dapat digunakan (≥ -75 dB), luas *dead zone* (≤ -90 dB), dan rata-rata intensitas sinyal pada seluruh domain. Ambang batas -75 dB dipilih karena sinyal pada kisaran tersebut masih dapat mendukung komunikasi dasar, sedangkan sinyal ≤ -90 dB dikategorikan sebagai *dead zone* karena perangkat umumnya tidak dapat terhubung ke jaringan Wi-Fi. Hasil perbandingan metrik ditunjukkan pada Tabel.

Tabel 2. Perbandingan metrik kuantitatif distribusi sinyal tiap variasi

Variasi	Area ≥ 75 dB (%)	Dead zone (m^2)	Rata-rata sinyal (dB)
1	31,24%	45,53	-86,76
2	19,32%	55,86	-114,87
3	15,02%	71,03	-118,49
4	17,39%	61,10	-116,95
5	26,85%	32,49	-88,78

Berdasarkan Tabel 2, Variasi 1 menunjukkan kinerja terbaik dengan persentase area yang masih dapat menggunakan jaringan Wi-Fi terbesar dan nilai rata-rata sinyal tertinggi, serta luas *dead zone* yang relatif kecil. Variasi 5 menunjukkan kinerja terbaik kedua dengan cakupan area yang masih dapat menggunakan Wi-Fi yang cukup luas dan *dead zone* yang lebih kecil dibandingkan variasi lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa penempatan *router* pada posisi yang lebih sentral menghasilkan distribusi sinyal yang lebih optimal.

3.7. Uji Konvergensi Mesh

Uji konvergensi *mesh* dilakukan untuk memastikan bahwa ukuran *mesh* yang digunakan telah memberikan hasil yang akurat dan stabil. Pengujian ini menggunakan tiga ukuran *mesh*, yaitu 0.025 m, 0.015 m, dan 0.01 m, dan dilakukan pada Variasi 1 sebagai kasus representatif. Hal ini bertujuan untuk mengevaluasi apakah *mesh* yang digunakan dalam simulasi utama telah cukup baik untuk merepresentasikan solusi numerik. Hasil uji konvergensi *mesh* ditunjukkan pada Tabel berikut.

Tabel 3. Hasil uji konvergensi *mesh*

Ukuran <i>mesh</i>	Jumlah elemen	Jumlah node	Rata-rata sinyal
0.025	5391	11228	-86.76 dB
0.015	9033	18612	-95.82 dB
0.01	13467	27628	-91.62 dB

Berdasarkan Tabel 3, nilai rata-rata intensitas sinyal berada pada kisaran yang relatif sama tanpa perubahan yang signifikan seiring dengan pengecilan ukuran *mesh*. Hal ini menunjukkan bahwa solusi numerik telah mencapai kondisi yang cukup stabil. *Mesh* dengan ukuran 0.025 m memberikan hasil yang relatif dekat dengan *mesh* yang lebih halus, sehingga dianggap telah memberikan akurasi yang memadai. Oleh karena itu, *mesh* dengan ukuran 0.025 m digunakan dalam seluruh simulasi karena memberikan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi.

3.8. Analisis Perbandingan Variasi dan Posisi Optimal Router

Berdasarkan kelima variasi penempatan *router*, terlihat jelas bahwa distribusi sinyal sangat dipengaruhi oleh posisi awal sumber relatif terhadap geometri ruangan berbentuk L. Variasi 1 (Ruang Tengah) terbukti memberikan cakupan paling superior. Posisi ini memungkinkan gelombang menyebar secara radial ke segala arah dengan hambatan awal yang minimal. Sinyal dapat menjangkau hampir seluruh area, baik lorong maupun kamar tidur, dengan redaman yang relatif kecil karena banyaknya jalur *Line-of-Sight* (LOS) langsung ke pintu-pintu ruangan. Variasi 5 (Persimpangan Siku L) muncul sebagai alternatif terbaik kedua. Posisi ini unggul dalam mengalirkan sinyal sepanjang koridor berkat efek *waveguide*. Namun, intensitas sinyal yang masuk ke dalam kamar-kamar tidur sedikit lebih rendah dibandingkan Variasi 1. Hal ini disebabkan karena gelombang dari lorong sempit harus mengalami difraksi (pembelokan) yang tajam untuk dapat masuk melewati pintu kamar, yang mengakibatkan penurunan daya (*power loss*) yang tidak terjadi pada penyebaran radial di Variasi 1. Sebaliknya, Variasi 2, 3, dan 4 (Posisi Sudut) menunjukkan performa yang tidak efisien. Ketika *router* ditempatkan di ujung ruangan (terutama Variasi 2 dan 3), sinyal cenderung terperangkap (*trapping*) di ruang sumber dan melemah signifikan saat harus menembus dinding tebal secara diagonal. Hal ini menghasilkan area *dead zone* yang luas pada sayap bangunan yang berlawanan.

3.9. Keterbatasan Model

Simulasi pada penelitian ini dibatasi pada formulasi dua dimensi (2D) dengan medium homogen serta kondisi batas dinding berupa Neumann homogen yang mengidealisasi dinding sebagai pemantul sempurna. Konsekuensinya, model belum memasukkan rugi material (*loss*) akibat konduktivitas dan permitivitas kompleks, belum memodelkan penetrasi gelombang melalui dinding/partisi, dan belum merepresentasikan efek 3D seperti variasi ketinggian antenna, lantai bertingkat, polarisasi penuh (vektor), maupun multipath vertikal. Selain itu, penggunaan domain tertutup dengan Neumann homogen cenderung memperkuat refleksi internal dan dapat menghasilkan pola interferensi yang lebih ‘ideal’ dibandingkan kondisi bangunan nyata yang memiliki peredaman dan kebocoran energi. Oleh karena itu, hasil distribusi dB pada penelitian ini sebaiknya dipahami sebagai pemetaan relatif (perbandingan antar-posisi router) dan bukan prediksi absolut daya terima; pengembangan berikutnya dapat memasukkan sifat material dinding, model penyerapan/absorbing boundary (mis. PML), serta pemodelan 3D untuk meningkatkan realisme [22], [25].

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pemodelan matematis dan simulasi numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM) terhadap persamaan Helmholtz untuk menganalisis propagasi sinyal Wi-Fi pada ruangan kompleks, dapat disimpulkan bahwa persamaan Helmholtz mampu merepresentasikan perilaku propagasi sinyal secara numerik dan FEM berhasil menyelesaikannya pada domain tidak beraturan seperti denah rumah berbentuk L. FEM juga efektif dalam memvisualisasikan pola penyebaran gelombang pada ruangan yang memiliki sekat serta percabangan, di mana penggunaan *mesh* segitiga berukuran kecil menghasilkan visualisasi yang lebih stabil dan informatif. Selain itu, geometri ruangan dan posisi *router* terbukti sangat memengaruhi distribusi sinyal; penempatan *router* di bagian tengah ruangan memberikan cakupan yang lebih merata dan meminimalkan zona lemah, sedangkan penempatan di sudut atau ujung ruangan menyebabkan redaman yang lebih besar akibat penghalang dinding dan jalur ruang yang berbelok. Dengan demikian, simulasi berbasis FEM dapat dimanfaatkan sebagai alat bantu untuk mengoptimalkan penempatan *router* Wi-Fi, khususnya pada bangunan dengan tata ruang kompleks dan banyak sekat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.

- [2] B. M. Zeleke *et al.*, “Wi-fi related radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF): a pilot experimental study of personal exposure and risk perception,” *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 671–680, 2021, doi: 10.1007/s40201-021-00636-7.
- [3] W. Stallings, *Wireless Communications & Networks*, 2nd ed. Pearson, 2021.
- [4] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1998.
- [5] S. Vujević, “Maxwell’s and Wave Equations in Media Containing Electromagnetic Field Sources,” *Int. J. Eng. Model.*, vol. 38, no. 2, pp. 1–19, 2025, doi: 10.31534/engmod.2025.2.ri.01d.
- [6] H. Hashemi, “The Indoor Radio Propagation Channel,” *Proc. IEEE*, vol. 81, no. 7, pp. 943–968, 1993, doi: 10.1109/5.231342.
- [7] J.-M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley–IEEE Press, 2014.
- [8] S. Ham and K. J. Bathe, “A finite element method enriched for wave propagation problems,” *Comput. Struct.*, vol. 94–95, pp. 1–12, 2012, doi: 10.1016/j.compstruc.2012.01.001.
- [9] J. M. Melenk and I. Babuška, “The partition of unity finite element method: Basic theory and applications,” *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 139, no. 1–4, pp. 289–314, 1996, doi: 10.1016/S0045-7825(96)01087-0.
- [10] A. D. Garnadi, H. Alatas, S. Nurdianti, and L. Yuliawati, *Metode Elemen Hingga Ranah Frekuensi Untuk Simulasi Pandu Gelombang dalam MATLAB/OCTAVE*. Bandung, ID: ITBPress, 2019.
- [11] S. Bakirtzis, J. Chen, K. Qiu, J. Zhang, and I. Wassell, “EM DeepRay: An Expedient, Generalizable, and Realistic Data-Driven Indoor Propagation Model,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, no. 6, pp. 4140–4154, 2022, doi: 10.1109/TAP.2022.3172221.
- [12] A. Seretis and C. D. Sarris, “Toward Physics-Based Generalizable Convolutional Neural Network Models for Indoor Propagation,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, no. 6, pp. 4112–4126, 2022, doi: 10.1109/TAP.2021.3138535.
- [13] H. Zhang *et al.*, “mmWave Indoor Channel Measurement Campaign for 5G New Radio Indoor Broadcasting,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 68, no. 2, pp. 331–344, 2022, doi: 10.1109/TBC.2021.3131864.
- [14] S. S. Ghassemzadeh, R. Jana, C. W. Rice, W. Turin, and V. Tarokh, “Measurement and modeling of an ultra-wide bandwidth indoor channel,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 10, pp. 1786–1796, 2004, doi: 10.1109/TCOMM.2003.820755.
- [15] A. A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, “A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 5, no. 2, pp. 128–137, 1987, doi: 10.1109/JSAC.1987.1146527.
- [16] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, “914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 2, pp. 207–217, 1992, doi: 10.1109/8.127405.
- [17] J. M. Keenan and A. J. Motley, “Radio coverage in buildings,” *Br. Telecom Technol. J.*, vol. 8, no. 1, pp. 19–24, 1990.
- [18] T. A. Wysocki and H.-J. Zepernick, “Characterization of the indoor radio propagation channel at 2.4 GHz,” *J. Telecommun. Inf. Technol.*, no. 3–4, pp. 84–90, 2000, doi: 10.26636/jtit.2000.3-4.23.
- [19] D. M. Amzucu, H. Li, and E. Fledderus, “Indoor radio propagation and interference in 2.4 GHz wireless sensor networks: Measurements and analysis,” *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 76, no. 2, pp. 245–269, 2014, doi: 10.1007/s11277-014-1694-2.
- [20] S. C. Kim, H. L. Bertoni, and M. Stem, “Pulse propagation characteristics at 2.4 GHz inside buildings,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, no. 3, pp. 579–592, 1996, doi: 10.1109/25.533773.
- [21] Z. Zhang, R. K. Sorensen, Z. Yun, M. F. Iskander, and J. F. Harvey, “A ray-tracing

- approach for indoor/outdoor propagation through window structures,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 50, no. 5, pp. 742–749, 2002, doi: 10.1109/TAP.2002.1011242.
- [22] H. Obeidat *et al.*, “Indoor environment propagation review,” *Comput. Sci. Rev.*, vol. 37, 2020, doi: 10.1016/j.cosrev.2020.100272.
 - [23] Lee Jin-Fa, Lee Robert, and A. Cangellaris, “Time-domain finite-element methods,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 45, no. 3, pp. 430–442, 1997, doi: 10.1109/8.558658.
 - [24] D. Jiao, M. Lu, E. Michielssen, and J. M. Jin, “A fast time-domain finite element-boundary integral method for electromagnetic analysis,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 10, pp. 1453–1461, 2001, doi: 10.1109/8.954934.
 - [25] X. Jiang and X. Duan, “A PML Finite Element Method for Electromagnetic Scattering Problems in a Two-Layer Medium,” *J. Sci. Comput.*, vol. 90, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s10915-021-01678-7.
 - [26] J. P. Berenger, “A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,” *J. Comput. Phys.*, vol. 114, no. 2, pp. 185–200, 1994, doi: 10.1006/jcph.1994.1159.
 - [27] Palace, “Boundary Conditions.” Accessed: Feb. 15, 2026. [Online]. Available: <https://awslabs.github.io/palace/dev/guide/boundaries/>
 - [28] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, “Boundary Conditions.”