

Analisis Pengaruh *Foliage Loss* Terhadap Performa Jaringan 5g *Mmwave* 26 Ghz Pada Kondisi Los Dan Nlos Di Wilayah *Rural Macro* (RMA)

1st Hafidzsyah Fauzil Adim Fakultas
Teknik Telekomunikasi dan Elektro
Telkom University Purwokerto
NIM 20101172

2nd Achmad Rizal Danisya S.T., M.T.
Fakultas Teknik Telekomunikasi dan
Elektro
Telkom University Purwokerto
NIP. 14850077

3rd Dr. Alfin Hikmaturokhman, S.T.,
M.T. Fakultas Teknik
Telekomunikasi dan Elektro
Telkom University Purwokerto
NIP. 14850077

Abstrak — Indonesia merupakan negara beriklim tropis dengan tingkat kelembapan tinggi serta kepadatan vegetasi yang signifikan, terutama di wilayah pedesaan. Kondisi geografis dan ekologis tersebut menjadikan vegetasi sebagai salah satu faktor dominan yang memengaruhi kualitas propagasi sinyal khususnya pada frekuensi tinggi. Teknologi jaringan 5G dengan pemanfaatan *millimeter wave* (*mmWave*) menawarkan kecepatan transmisi data yang tinggi dan kapasitas besar guna memenuhi pertumbuhan eksponensial jumlah perangkat serta kebutuhan akan *Bandwidth* luas dan latensi rendah. Namun demikian, karakteristik *mmWave* yang beroperasi pada pita frekuensi di atas 24 GHz menimbulkan tantangan tersendiri terkait keterbatasan jangkauan serta tingginya tingkat redaman sinyal, terutama akibat interaksi dengan vegetasi. Salah satu tantangan utama dalam konteks lingkungan *Rural Macro* (RMA) adalah *foliage loss*. Proses simulasi dilakukan pada frekuensi

26 GHz dengan memanfaatkan pendekatan *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM) yang diimplementasikan melalui perangkat lunak *channel simulator* NYUSIM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada frekuensi 26 GHz di lingkungan *Rural Macro*, kondisi NLOS mengalami penurunan performa sinyal yang lebih signifikan dibandingkan LOS, dengan rata-rata *received power* -116.77 dBm dan *pathloss* 146.77 dB, jauh lebih buruk dibandingkan LOS (-100.06 dBm dan 130.06 dB). *Foliage loss* terbukti menjadi faktor utama redaman, pemilihan numerologi $\mu = 2$ dengan subcarrier spacing 60 kHz dinilai optimal untuk menghindari *inter-symbol interference* pada kedua skenario.

Kata kunci — 5G *mmWave*, *foliage loss*, *Rural Macro* (RMA), *Power Delay Profile* (PDP), NYUSIM, LOS, NLOS.

I. PENDAHULUAN

Komunikasi nirkabel merupakan salah satu sektor teknologi yang berkembang pesat seiring meningkatnya penggunaan perangkat mobile dan meluasnya infrastruktur jaringan. Pada tahun 2025, jumlah perangkat yang terkoneksi ke jaringan seluler diproyeksikan melebihi 20 miliar, didorong oleh kemunculan *Internet of Things* (IoT) untuk berbagai aplikasi seperti kota pintar, transportasi pintar, layanan kesehatan digital, hingga sistem pertanian cerdas [1]. Teknologi 5G, khususnya pada frekuensi *millimeter wave*

(*mmWave*), menawarkan kapasitas besar dan kecepatan tinggi, namun rentan terhadap redaman propagasi, terutama pada skenario *Rural Macro* (RMA) yang memiliki hambatan vegetasi signifikan.

Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa *mmWave* memiliki karakteristik propagasi yang unik, seperti redaman transmisi yang meningkat terhadap frekuensi, sensitivitas terhadap hambatan fisik, dan penurunan probabilitas *Line of Sight* (LOS) seiring bertambahnya jarak. Meskipun demikian, hasil pengukuran pada frekuensi 28 dan 73 GHz menunjukkan kinerja yang masih dapat diandalkan pada kondisi *Non Line of Sight* (NLOS) [2]. Salah satu tantangan utama adalah *foliage attenuation*, yaitu redaman akibat interaksi gelombang elektromagnetik dengan daun, batang, dan cabang pohon. Faktor ini dipengaruhi oleh frekuensi, ketebalan vegetasi, kelembapan, sudut datang gelombang, dan jenis vegetasi [3]. Selain itu, kondisi atmosfer seperti hujan, kabut, dan penyerapan oleh gas turut memperburuk propagasi sinyal pada pita frekuensi tinggi [4].

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini meliputi: (1) pengaruh *foliage loss* terhadap kinerja jaringan 5G *mmWave* pada kondisi LOS dan NLOS, (2) perbandingan performa kedua skenario tersebut, serta (3) penentuan numerologi optimal yang sesuai untuk masing-masing kondisi. Untuk menjawab permasalahan ini, dilakukan simulasi pada frekuensi 26 GHz menggunakan pendekatan *Statistical Spatial Channel Model* (SSCM) yang diimplementasikan pada simulator kanal NYUSIM [5].

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis karakteristik *Power Delay Profile* (PDP) dan parameter kanal lainnya pada kondisi LOS dan NLOS di lingkungan RMA, serta merekomendasikan konfigurasi numerologi yang optimal. Hasilnya diharapkan dapat menjadi acuan dalam perencanaan dan optimasi jaringan 5G berbasis *mmWave* di wilayah pedesaan dengan vegetasi padat.

II. KAJIAN TEORI

A. *Analysis of Vegetation and Penetration Losses in 5G mmWave Communication Systems*

Penelitian ini membahas tantangan utama dalam pengembangan sistem komunikasi 5G berbasis millimeter wave (mmWave), khususnya kehilangan sinyal akibat vegetasi dan hambatan material (penetration loss). Propagasi mmWave mengalami redaman signifikan saat melewati area dengan vegetasi padat atau material keras. Studi pada frekuensi 28 GHz menunjukkan bahwa besarnya redaman sangat bergantung pada kedalaman vegetasi dan jenis material penghalang, di mana material lunak memiliki redaman lebih rendah dibanding material keras. Hasil ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan faktor lingkungan fisik dalam perencanaan jaringan 5G pada wilayah dengan banyak hambatan alami maupun buatan [6].

B. *Raytracing Digital Foliage at Millimeter-Wave: A Case Study on Calibration Against 60-GHz Channel Measurements on Summer and Winter Trees*

Penelitian ini mengkaji pemodelan propagasi sinyal mmWave melalui vegetasi menggunakan representasi digital detail dari pohon, meliputi daun dan cabang, yang dimodelkan dalam bentuk mesh. Model dikalibrasi dengan data pengukuran kanal 60 GHz pada pohon musim panas dan musim dingin. Simulasi dilakukan menggunakan raytracing Ansys HFSS SBR+ yang dipercepat GPU, menghasilkan prediksi redaman yang sangat akurat dan sesuai dengan pengukuran lapangan. Studi ini menunjukkan potensi raytracing digital untuk desain jaringan 5G realistis pada area dengan hambatan vegetasi [7].

C. *Performance Analysis of a Millimeter Wave Communication System in Urban Micro, Urban Macro, and Rural Macro Environments*

Penelitian ini menganalisis pengaruh lingkungan terhadap daya sinyal mmWave di skenario Urban Micro (UMi), Urban Macro (UMa), dan Rural Macro (RMa). Model kehilangan jalur skala besar digunakan untuk memperkirakan redaman pada frekuensi 28, 38, 60, dan 75 GHz. Hasil menunjukkan bahwa model kanal 5GCM memprediksi path loss lebih rendah dan daya sinyal lebih tinggi di semua lingkungan dibanding model lain. Skenario mikro perkotaan memiliki redaman terendah, sedangkan pedesaan tertinggi. Penelitian ini menekankan pentingnya pemilihan model kanal yang tepat untuk setiap jenis lingkungan [1].

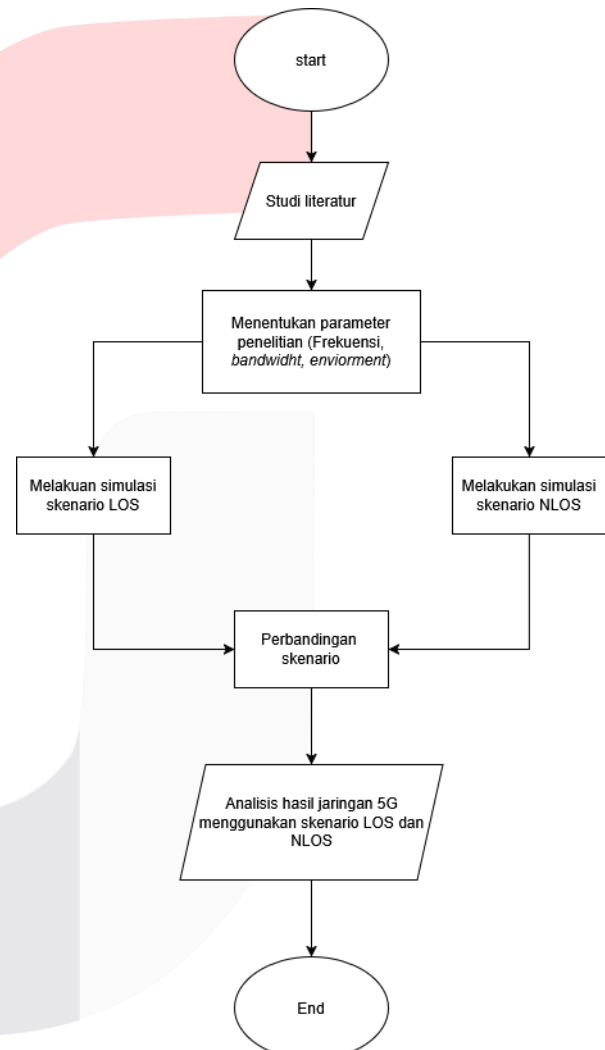
D. *Simulasi Performansi dan Kapasitas Kanal pada Komunikasi Jaringan 5G Menggunakan Simulator NYUSIM*

Penelitian ini melakukan simulasi kanal komunikasi 5G mmWave pada frekuensi 26 GHz skenario NLOS menggunakan perangkat lunak NYUSIM, dengan parameter lingkungan nyata di Kota Tangerang. Lima output utama dihasilkan, termasuk Power Delay Profile (PDP) dan RMS delay spread. Hasil menunjukkan path loss dan path loss exponent (PLE) lebih tinggi pada antena directional dibanding omnidirectional, namun delay spread lebih kecil pada sistem directional. Temuan ini memberikan panduan penting dalam pemilihan jenis antena dan konfigurasi optimal pada jaringan 5G di lingkungan urban tropis [8].

E. *Pengaruh Human Blockage pada Model Kanal 5G dengan Frekuensi 28 GHz*

Penelitian ini menilai pengaruh hambatan manusia (human blockage) terhadap performa kanal 5G mmWave pada frekuensi 28 GHz. Simulasi dilakukan pada kondisi dengan dan tanpa hambatan manusia, menggunakan modulasi QPSK dan sistem CP-OFDM. Hasil menunjukkan jumlah jalur pada PDP tetap sama, namun terjadi penurunan kinerja outage, Frame Error Rate (FER), dan Bit Error Rate (BER) pada kondisi dengan hambatan manusia, dengan selisih SNR 1,8–2 dB dibanding teori BER. Studi ini menegaskan bahwa hambatan manusia memengaruhi kualitas kanal, meskipun tidak secara signifikan merusak kinerja sistem secara keseluruhan [9].

III. METODE



GAMBAR 1
(DIAGRAM ALUR PENELITIAN.)

Diagram alur pada Gambar 1 merupakan representasi visual yang menggambarkan tahapan-tahapan dalam proses penelitian ini, literatur yang dikaji mencakup standar teknis yang ditetapkan oleh *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), artikel ilmiah, serta hasil penelitian terdahulu yang membahas performa jaringan 5G dalam berbagai kondisi propagasi, termasuk skenario *Line of Sight* (LOS) dan *Non-Line of Sight* (NLOS). Studi literatur ini juga mencakup pemahaman terhadap model propagasi pada lingkungan *Rural Macrocell* (RMa).

Parameter yang dipilih dalam penelitian ini disesuaikan dengan skenario *Rural Macro* (RMa), yaitu skenario yang merepresentasikan area pedesaan atau wilayah luar kota yang umumnya memiliki cakupan area sangat luas dan kepadatan pengguna yang relatif rendah. Pada skenario ini, frekuensi operasi yang digunakan adalah 26 GHz, yang termasuk dalam pita *millimeter wave* (*mmWave*). Lebar pita frekuensi atau *Bandwidth* yang digunakan adalah 100 MHz, dipilih untuk menggambarkan kapasitas kanal yang mampu mengakomodasi data berkecepatan tinggi. Lebar pita ini merepresentasikan salah satu opsi realistis dalam implementasi 5G, ketinggian *Base Station* (BS) ditetapkan sebesar 35 meter, yang merupakan ketinggian tipikal untuk skenario RMa sebagaimana direkomendasikan oleh standar 3GPP. Ketinggian ini dipilih untuk meminimalkan hambatan dari vegetasi atau kontur tanah di wilayah rural, sekaligus memperluas cakupan area LOS agar dapat menjangkau pengguna pada jarak yang lebih jauh. *Foliage attenuation* atau redaman vegetasi yang digunakan dalam simulasi ditetapkan sebesar 2 dB. Nilai ini diambil berdasarkan studi empiris pada frekuensi *mmWave* yang menunjukkan bahwa redaman vegetasi pada jarak tertentu dapat berada pada kisaran rendah hingga sedang, tergantung pada kepadatan dedaunan dan kelembapan. Penetapan nilai ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi yang representatif di wilayah rural dengan vegetasi yang tidak terlalu lebat, sehingga efek redaman masih terukur namun tidak ekstrem. Untuk memperoleh hasil yang representatif secara statistik, jumlah titik lokasi penerima (*receiver/RX*) yang disimulasikan ditetapkan sebanyak 100 titik. Selain itu, konfigurasi antena yang digunakan adalah MIMO 4×4 dengan tipe *Uniform Rectangular Array*. Pemilihan MIMO 4×4 dilakukan karena teknologi MIMO dapat meningkatkan kapasitas kanal, mengurangi efek fading, dan mendukung *spatial diversity*, yang sangat bermanfaat pada frekuensi *mmWave* untuk mempertahankan kualitas sinyal pada jarak yang lebih jauh. URA dipilih karena memiliki pola radiasi yang lebih fleksibel untuk mencakup area luas secara horizontal maupun vertikal, sehingga cocok untuk aplikasi di skenario RMa.

Tahap selanjutnya dari penelitian adalah melakukan simulasi pada kondisi LOS, di mana diasumsikan sinyal mengalami hambatan atau terhalang oleh objek seperti bangunan, vegetasi, atau kontur permukaan bumi, yang menyebabkan sinyal mengalami pantulan (*refleksi*), pembiasan (*refraction*), atau difraksi. Kemudian dilakukan simulasi untuk skenario NLOS, dengan asumsi Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi performa jaringan dalam kondisi optimal.

Pengambilan data dilakukan dengan mengukur *Received Power* (daya terima) dan *Pathloss* pada setiap titik penerima yang telah ditentukan. Data ini kemudian dianalisis menggunakan metode *Probability Density Function* (PDF) dan *Cumulative Distribution Function* (CDF) untuk masing-masing skenario LOS dan NLOS. Hasil analisis PDF dan CDF untuk kedua skenario kemudian dibandingkan secara langsung. Pada skenario LOS. Analisis dilakukan tidak hanya untuk mengevaluasi *Received Power* dan *Pathloss*, tetapi juga untuk memperoleh parameter *numerology* yang paling sesuai dengan karakteristik kanal pada masing-masing skenario. Proses penentuan *numerology* ini dilakukan dengan mempertimbangkan parameter-parameter hasil pengukuran, seperti distribusi nilai daya terima, tingkat redaman, delay

spread, serta kapasitas kanal yang diperoleh dari analisis PDF dan CDF.

Dengan memperoleh *numerology* yang tepat, optimasi konfigurasi sistem 5G *mmWave* dapat dilakukan secara efektif, khususnya dalam pemilihan *subcarrier spacing* (SCS) dan durasi simbol *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) yang sesuai dengan kondisi propagasi di lapangan. Pemilihan *numerology* ini didasarkan pada karakteristik kanal yang diperoleh melalui pengukuran *Received Power* dan *Pathloss* menggunakan analisis *Probability Density Function* (PDF) dan *Cumulative Distribution Function* (CDF), serta parameter kanal penting seperti *Root Mean Square* (RMS) *delay spread* dan *coherence bandwidth*.

Coherence bandwidth dapat diperkirakan dari RMS *delay spread* dengan rumus (3.1) dan (3.2) :

$$B_c = \frac{1}{5\sigma_\tau} \quad (3.1)$$

B_c = Coherence Bandwidth (Hz)
 σ_τ = RMS *delay spread* (ns)

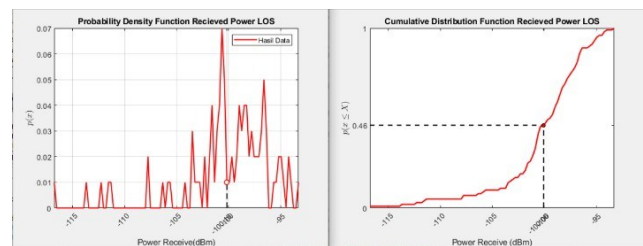
$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (3.2)$$

σ_τ = RMS *delay spread* (ns)
 $\bar{\tau}^2$ = Nilai rata-rata kuadrat *delay* (ns²)
 $\bar{\tau}$ = Mean excess *delay* (ns)

Dengan mempertimbangkan nilai RMS *delay spread* dan *coherence bandwidth* dalam pemilihan *numerology*, sistem dapat dioptimalkan untuk mencapai keseimbangan antara kapasitas, latensi, dan ketahanan terhadap multipath baik pada kondisi LOS maupun NLOS di lingkungan Rural Macro (RMa). Hasil akhir dari proses ini memberikan panduan teknis yang dapat dimanfaatkan dalam perencanaan dan pengembangan infrastruktur jaringan 5G di wilayah pedesaan. Penentuan *numerology* yang sesuai memastikan bahwa jaringan tidak hanya mampu menjangkau area yang luas, tetapi juga mampu mempertahankan kualitas layanan pada kondisi geografis yang beragam. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan insight teoretis mengenai perbedaan kinerja LOS dan NLOS, tetapi juga menghasilkan rekomendasi praktis untuk implementasi 5G *mmWave* yang optimal di area RMa.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. PDF DAN CDF RECEIVED POWER LOS

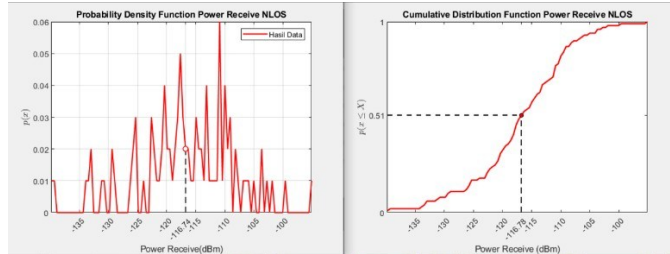


GAMBAR 2
PDF DAN CDF RECEIVED POWER LOS

Hasil simulasi pada Gambar 4.1 menunjukkan sebaran *Received Power* antara -116,89 dBm hingga -93,15 dBm,

dengan rata-rata -100,06 dBm. Nilai ini menandakan sebagian besar pengguna menerima sinyal pada tingkat daya tersebut. Kurva PDF memperlihatkan fluktuasi tajam akibat *multipath fading* dan redaman vegetasi (*foliage loss*) sebesar 2 dB. Analisis CDF menunjukkan lebih dari 46% titik penerimaan berada di bawah -100,06 dBm, mengindikasikan mayoritas *receiver* mengalami penurunan kualitas sinyal akibat pengaruh vegetasi.

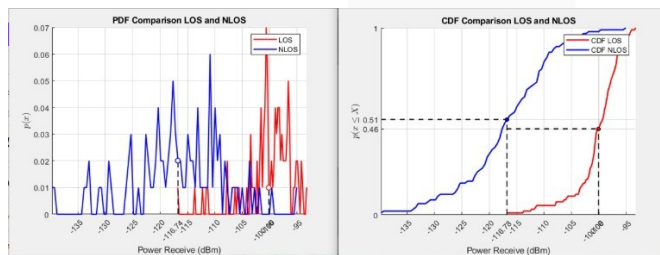
2. PDF DAN CDF RECEIVED POWER NLOS



GAMBAR 3
(PDF DAN CDF RECEIVED POWER NLOS)

Hasil pada Gambar 3 menunjukkan *Received Power* berkisar antara -139,95 dBm hingga -94,88 dBm, dengan puncak distribusi di sekitar -116,77 dBm. Variasi ini dipengaruhi oleh *multipath fading* dan redaman vegetasi (*foliage loss*) sebesar 2 dB. Analisis CDF memperlihatkan lebih dari 51% *receiver* menerima daya di bawah -116,77 dBm, menandakan mayoritas titik pengamatan berada pada kategori sinyal lemah akibat hambatan vegetasi pada skenario NLOS di wilayah rural.

3. PERBANDINGAN PDF DAN CDF RECEIVED POWER LOS DAN NLOS

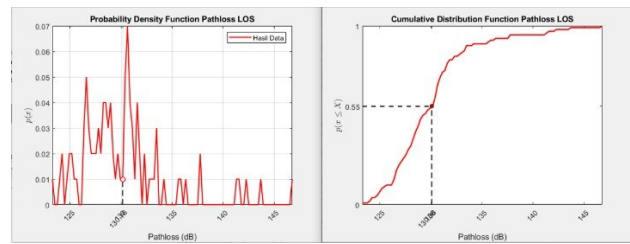


GAMBAR 4
(PERBANDINGAN PDF DAN CDF RECEIVED POWER LOS)

Gambar 4 menunjukkan perbedaan kinerja sinyal antara skenario LOS dan NLOS. Pada LOS, *Received Power* berada antara -116,89 dBm hingga -93,15 dBm, dengan rata-rata -100,06 dBm. Sebagian besar pengguna menerima sinyal pada tingkat daya menengah namun relatif lemah, dengan fluktuasi PDF yang tajam akibat *multipath fading* dan *foliage loss* 2 dB. CDF menunjukkan lebih dari 46% titik penerimaan berada di bawah -100,06 dBm.

Pada NLOS, daya sinyal tersebar lebih luas (-139,95 dBm hingga -94,88 dBm) dengan rata-rata -116,77 dBm. Puncak distribusi PDF berada di sekitar -116,3 dBm, menandakan mayoritas *receiver* menerima sinyal lebih rendah dibanding LOS. CDF memperlihatkan lebih dari 51% titik penerimaan berada di bawah -116,3 dBm. Hasil ini menegaskan bahwa kondisi NLOS mengalami penurunan performa signifikan akibat dominasi redaman vegetasi dan hambatan lingkungan.

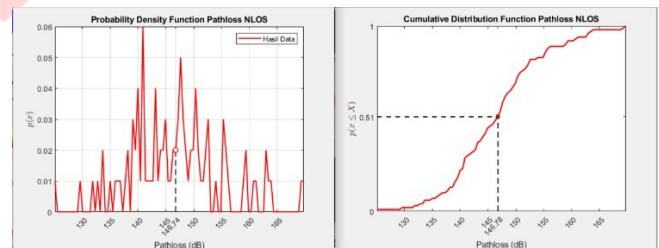
4. PDF DAN CDF PATHLOSS LOS



GAMBAR 5
(PDF DAN CDF PATHLOSS LOS)

Gambar 5 menunjukkan sebaran *Pathloss* pada kanal propagasi dengan rentang 123,15 dB hingga 146,89 dB, dan rata-rata 130,06 dB. Puncak distribusi di sekitar 130 dB menandakan sebagian besar lokasi mengalami redaman sinyal signifikan akibat jarak dan hambatan vegetasi. Analisis CDF menunjukkan sekitar 55% titik penerimaan memiliki *Pathloss* di bawah rata-rata, sementara sisanya mengalami redaman tinggi. Hasil ini mencerminkan karakteristik kanal di wilayah rural dengan vegetasi padat dan jarak antar perangkat besar, yang memengaruhi keandalan dan jangkauan sinyal 5G.

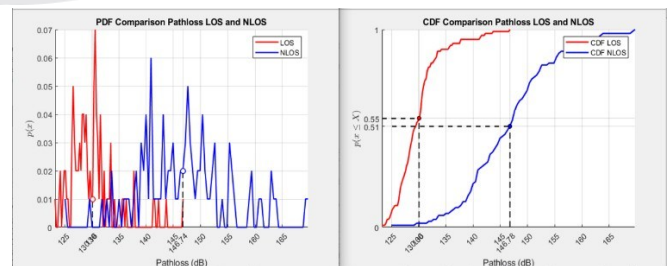
5. PDF DAN CDF PATHLOSS NLOS



GAMBAR 6
(PDF DAN CDF PATHLOSS NLOS)

Gambar 6 menunjukkan distribusi *Pathloss* pada kondisi NLOS dengan rentang 124,88 dB hingga 169,95 dB dan rata-rata 146,77 dB. Puncak distribusi di sekitar 140 dB serta variasi nilai yang lebar mencerminkan pengaruh redaman kompleks akibat *foliage loss*, difraksi, dan pantulan *multipath*. Analisis CDF menunjukkan sekitar 51% titik penerimaan memiliki *Pathloss* di bawah 146,77 dB, menandakan separuh lokasi berada pada kondisi redaman tinggi yang berpotensi menurunkan kualitas dan keandalan komunikasi. Temuan ini menegaskan perlunya mempertimbangkan faktor vegetasi dan kondisi lingkungan dalam perencanaan jaringan 5G di area rural NLOS.

6. PERBANDINGAN PDF DAN CDF PATHLOSS LOS DAN NLOS



GAMBAR 7
PERBANDINGAN PDF DAN CDF PATHLOSS LOS DAN NLOS

Gambar 4.6 memperlihatkan perbandingan *Pathloss* LOS dan NLOS. Pada LOS, distribusi lebih sempit (123,15–146,89 dB) dengan rata-rata 130,06 dB, menandakan redaman relatif rendah dan cakupan sinyal yang lebih baik. Sebaliknya, NLOS memiliki sebaran lebih luas (124,88–169,95 dB) dengan rata-rata 146,77 dB, menunjukkan redaman jauh lebih besar akibat hambatan vegetasi, bangunan, difraksi, dan *multipath*. CDF mengindikasikan 55% titik LOS berada di bawah rata-rata *Pathloss*, sedangkan pada NLOS, 51% titik memiliki *Pathloss* di atas rata-rata, menandakan kualitas sinyal yang lebih buruk. Perbedaan ini menegaskan pengaruh signifikan *foliage loss* dan hambatan fisik terhadap kinerja jaringan 5G di wilayah pedesaan, sehingga menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan lokasi pemancar dan konfigurasi antena.

7. MODEL KANAL 5G MMWAVE RURAL MACRO (RMA)

Pemilihan numerologi sangat bergantung pada karakteristik kanal propagasi yang ditentukan melalui analisis statistik delay spread. Langkah awal dalam proses ini adalah menghitung PDP, yang memberikan informasi tentang intensitas daya dari sinyal multipath sebagai fungsi dari delay. Dari distribusi PDP ini, dihitung nilai mean excess delay ($\bar{\tau}$) dan mean square excess delay ($\bar{\tau}^2$) pada setiap skenario LOS dan NLOS menggunakan persamaan secara berturut turut:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{k=0}^k P(\tau_k) \cdot \tau_k}{\sum_{k=0}^k P(\tau_k)}$$

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_{k=0}^k P(\tau_k) \cdot \tau_k^2}{\sum_{k=0}^k P(\tau_k)}$$

Dalam penelitian ini, penghitungan $\bar{\tau}$ dan $\bar{\tau}^2$ dilakukan untuk setiap titik pengukuran berdasarkan data hasil konversi dari daya terima (dBm) menjadi skala linear (mW), kemudian dikalikan dengan nilai delay masing-masing lintasan. Karena jumlah data pengukuran pada penelitian ini sangat besar yaitu 100 titik pengukuran untuk setiap skenario. Ringkasan hasil perhitungan pada salah satu skenario pengukuran menunjukkan bahwa:

1. Skenario LOS

$$\bar{\tau} = 4.01 \times 10^2 \text{ ns}$$

$$\bar{\tau}^2 = 1.63 \times 10^5 \text{ ns}$$

2. Skenario NLOS

$$\bar{\tau} = 4.06 \times 10^2 \text{ ns}$$

$$\bar{\tau}^2 = 1.66 \times 10^5 \text{ ns}$$

Setelah menemukan nilai $\bar{\tau}$ dan $\bar{\tau}^2$ dari setiap skenarionya sebagai parameter untuk mencari nilai RMS

delay spread (σ_τ), dari nilai σ_τ maka dapat memperoleh coherence Bandwidth (B_c):

1. Skenario LOS

$$\sigma_\tau = \sqrt{4.06 \times 10^2 - 1.66 \times 10^5} = 46.5515 \text{ ns}$$

$$B_c = \frac{1}{5 \times 38.1072} = 4.29 \text{ MHz}$$

2. Skenario NLOS

$$\sigma_\tau = \sqrt{4.06 \times 10^2 - 1.66 \times 10^5} = 38.1072 \text{ ns}$$

$$B_c = \frac{1}{5 \times 38.1072} = 5.25 \text{ MHz}$$

Berdasarkan nilai coherence Bandwidth yang telah didapatkan langkah selanjutnya adalah mencocokkannya dengan parameter numerologi 5G NR, yang ditentukan oleh rumus $\Delta f = 2^\mu \times 15 \text{ kHz}$, di mana μ menyatakan tingkat numerologi yang memengaruhi jarak antar subcarrier dan durasi simbol. Pemilihan nilai μ bertujuan agar durasi simbol dari sistem *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) tetap jauh lebih besar dibandingkan dengan nilai RMS delay spread, guna menghindari terjadinya inter-symbol interference (ISI). Hasil simulasi skenario LOS dan NLOS menunjukkan bahwa σ_τ masing-masing adalah sekitar 46,55 ns dan 38,11 ns, yang menghasilkan B_c sebesar 4,29 MHz dan 5,25 MHz. Berdasarkan parameter ini, penggunaan numerologi dengan $\mu = 2$ (yang menghasilkan subcarrier spacing 60 kHz dan durasi simbol 16,67 μ s) dianggap tepat, karena nilai durasi simbol yang jauh lebih besar dari delay spread, analisis statistik dari PDP dan parameter terkait sangat krusial dalam menentukan konfigurasi sistem komunikasi 5G NR yang optimal dan adaptif terhadap kondisi lingkungan propagasi yang kompleks.

TABEL 1
COHERENCE BANDWIDTH

	NLOS	LOS
Max delay (ns)	499.2026	499.2026
Min delay (ns)	335.54720	335.5472
Mean delay (ns)	420.5807	420.5807
Max Received Power (dBm)	-94.8815	-93.1536
Min Received Power (dBm)	139.95697	116.8967

Mean Received Power (dBm)	-116.7773	- 100.0628
Mean excess delay (ns)	4.06 $\times 10^2$	4.01 $\times 10^2$
Mean square excess delay spread (ns)	1.66 $\times 10^5$	1.63 $\times 10^5$
RMS delay spread (ns)	38.1072	46.5515
Coherence Bandwidth	5.25 MHz	4.29 MHz
Numerologi (5G NR)	$\mu = 2$	$\mu = 2$

V. KESIMPULAN

Pada skenario LOS di lingkungan RMa 26 GHz, rata-rata Received Power sebesar -100,06 dBm dan Pathloss 130,06 dB menunjukkan kualitas sinyal relatif baik, meskipun sekitar 46% titik penerimaan berada di bawah rata-rata akibat foliage loss 2 dB, menandakan vegetasi sebagai faktor redaman signifikan. Sebaliknya, pada skenario NLOS, rata-rata Received Power -116,77 dBm dan Pathloss 146,77 dB mengindikasikan lebih dari 51% titik penerimaan mengalami sinyal di bawah rata-rata akibat hambatan propagasi seperti pepohonan dan bangunan yang memicu pantulan serta difraksi. Dibandingkan LOS, kondisi NLOS menunjukkan degradasi sinyal yang lebih signifikan dengan sebaran daya lebih luas, kanal kurang stabil akibat multipath fading, dan tingkat redaman yang jauh lebih besar. Analisis CDF menegaskan bahwa lebih dari separuh penerima NLOS berada di bawah ambang kualitas sinyal baik, sedangkan LOS cenderung lebih stabil. Berdasarkan hasil analisis, numerologi $\mu = 2$ dengan subcarrier spacing 60 kHz dan durasi simbol 16,67 μ s dinilai optimal untuk kedua skenario karena mampu menghindari inter-symbol interference (ISI) dengan durasi simbol yang jauh melebihi nilai RMS delay spread terukur.

REFERENSI

- [1] C. Sudhamani, M. Roslee, L. L. Chuan, A. Waseem, A. F. Osman, and M. H. Jusoh, "Performance Analysis of a Millimeter Wave Communication System in Urban Micro, Urban Macro, and Rural Macro Environments," *Energies*, vol. 16, no. 14, pp. 0–18, 2023, doi: 10.3390/en16145358.
- [2] D. Baxter, *Wireless Systems*. 2020. doi: 10.4324/9780080927268-13.
- [3] HAIRANI M AISARAH RAHIM, "FOLIAGE ATTENUATION IN URBAN TROPICAL VEGETATION AT MILLIMETER WAVE FREQUENCY BANDS," vol. 6, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [4] J. Schampheleer, A. Huss, and M. Deruyck, "Network-scale impact of vegetation loss on coverage and exposure for 5G networks," *IEEE Access*, vol. 13, no. January, pp. 23902–23912, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3538054.
- [5] H. Poddar, T. Yoshimura, M. Pagin, T. S. Rappaport, A. Ishii, and M. Zorzi, "Full-Stack End-to-End mmWave Simulations Using 3GPP and NYUSIM Channel Model in ns-3," *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2023-May, no. May, pp. 1048–1053, 2023, doi: 10.1109/ICC45041.2023.10278890.
- [6] G. Barb, F. Danuti, M. A. Ouamri, and M. Otesteanu, "Analysis of Vegetation and Penetration Losses in 5G mmWave Communication Systems," *2022 15th Int. Symp. Electron. Telecommun. ISETC 2022 - Conf. Proc.*, 2022, doi: 10.1109/ISETC56213.2022.10009963.
- [7] C. Lai, D. Senic, C. Gentile, J. Senic, and N. Golmie, "Raytracing Digital Foliage at Millimeter-Wave: A Case Study on Calibration Against 60-GHz Channel Measurements on Summer and Winter Trees," *IEEE Access*, vol. 11, no. December, pp. 145931–145943, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3345248.
- [8] I. A. Aristya and B. Maruddani, "Simulasi Performansi Dan Kapasitas Kanal Pada Komunikasi Jaringan 5G Menggunakan Simulator Nyusim," vol. 4, no. 2, pp. 15–25, 2021.
- [9] R. D. Wahyuningrum, "Pengaruh Human Blockage pada Model Kanal 5G dengan Frekuensi 28 GHz," *InComTech J. Telekomun. dan Komput.*, vol. 12, no. 2, p. 109, 2022, doi: 10.22441/incomtech.v12i2.13501.
- [10] K. H. Bamniya and R. K. Panchal, "International Journal of INTELLIGENT SYSTEMS AND APPLICATIONS IN ENGINEERING A Comprehensive Review of 5G Wireless Communication: Spectrum Diversity with Technological Innovations and Current Challenges," *Orig. Res. Pap. Int. J. Intell. Syst. Appl. Eng. IJISAE*, vol. 2024, no. 22s, pp. 1623–1627, 2024, [Online]. Available: www.ijisae.org
- [11] I. Rahayu and A. Firdausi, "5G Channel Model for Frequencies 28 GHz, 73 GHz and 4 GHz with Influence of Temperature in Bandung," *J. Teknol. Elektro*, vol. 13, no. 2, p. 94, 2022, doi: 10.22441/jte.2022.v13i2.006.
- [12] M. Mustafa, "Modeling and Analysis of End-to-End QoS Mapping For Wireless Networks," 2013. doi: 10.13140/2.1.5084.9920.
- [13] J. H. Lee and R. M. Buehrer, *FUNDAMENTALS OF RECEIVED SIGNAL STRENGTH - BASED POSITION LOCATION*. John Wiley & Sons, Inc, 2012. doi: 10.1002/9781118104750.ch11.
- [14] J. Hoy, *Forensic Radio Survey Techniques for Cell Site Analysis*, vol. 9781118925. John Wiley & Sons, Ltd., 2015. doi: 10.1002/9781118925768.
- [15] H. P. Theodore S. Rappaport, "NYUSIM: Sub-Terahertz and Millimeter-Wave Channel Simulator in MATLAB and ns-3," NYU WIRELESS P.I.s. [Online]. Available: https://wireless.engineering.nyu.edu/nyusim-thz-mmwave-channel-simulator-research
- [16] S. Sun, "NYUSIM – User License," *NYUSIM User Man.*, no. c, p. 2017, 2017.
- [17] A. Slavyansky, E. Zhdanov, O. Kharina, and A. Shpak, "Structural implementation of a beamforming module for active phased array antennas," vol. 03002, pp. 1–6, 2025.
- [18] A. J. Wiley, *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION*. 2005.
- [19] B. Osgood, "EE261 - Fourier Transform and its applications," *Lect. Notes EE 261 - Fourier Transform its Appl.*, pp. 1–498, 2014.
- [20] A. Kalis, A. G. Kanatas, and C. B. Papadias, *Parasitic antenna arrays for wireless MIMO systems*, vol.

9781461479994. 2013. doi: 10.1007/978-1-4614-7999-4.
- [21] R. Kumar, R. K. D. Harishchandra, and D. V. P. Singh, *Applications of Advanced Computing in Systems*. 2021. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-981-33-4862-2>
- [22] L. Malviya, R. K. Panigrahi, and M. V. Kartikeyan, *Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)*, vol. 11. CRC Press, 2021.
- [23] M. O. Khalifa, A. M. Yacoub, and D. N. Aloï, "Compact 2x2 and 4x4 MIMO antenna systems for 5G automotive applications," *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol. 36, no. 6, pp. 762–778, 2021, doi: 10.47037/2020.ACES.J.360619.
- [24] T. Specification, G. Radio, and A. Network, "3gpp tr 38.901," vol. 0, no. Release 19, 2025.
- [25] T. Specification, G. Radio, and A. Network, "3gpp tr 38.900," vol. 0, no. Release 15, 2018.
- [26] Y. Ma *et al.*, "Wireless Wave Attenuation in Forests: An Overview of Models," *Forests*, vol. 15, no. 9, p. 1587, 2024, doi: 10.3390/f15091587.
- [27] N. Y. U. Wireless, "by NYUSIM — User License," 2021.
- [28] Y. Lee, X. Ma, A. S. I. D. Lang, E. F. Valderrama-Araya, and A. L. Chapuis, "Deep Learning based Modeling of Wireless Communication Channel with Fading," *20th Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. Conf. IWCMC 2024*, pp. 1577–1582, 2024, doi: 10.1109/IWCMC61514.2024.10592504.
- [29] S. Arnon, "Wireless Communications," *Encycl. Opt. Photonic Eng. Second Ed.*, pp. 3348–3367, 2015, doi: 10.1081/E-EOE2-120009836.
- [30] W. Mohr, "Coherence Bandwidth of Rice Channels for Millimeter Wave and Sub-Terahertz Applications," *Wirel. World Res. Trends Mag.*, no. 10, pp. 21–32, 2024, doi: 10.13052/2794-7254.004.
- [31] F. Rinaldi, A. Raschellà, and S. Pizzi, "5G NR system design: a concise survey of key features and capabilities," *Wirel. Networks*, vol. 27, no. 8, pp. 5173–5188, 2021, doi: 10.1007/s11276-021-02811-y.