Analisis Kinerja Modulasi 5G NR pada Kanal AWGN, Rayleigh, dan Rician Fading: Evaluasi BER dan Throughput

Norma Amalia[1], A'isya Nur Aulia Yusuf[2], Dinda Wahyu Anggraeni[3], Hesti Susilawati[4], Laila Nurjannah[5]
[1, 2, 3, 4, 5] Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman, Indonesia
Email korespondensi: norma.amalia@unsoed.ac.id

Abstrak

Perkembangan jaringan 5G membutuhkan teknik modulasi yang mampu memberikan kompromi antara efisiensi spektral dan keandalan transmisi pada berbagai kondisi kanal propagasi. Penggunaan modulasi dengan orde lebih tinggi seperti 64-QAM dan 256-QAM dapat meningkatkan throughput, tetapi pada saat yang sama meningkatkan sensitivitas terhadap noise dan fading. Penelitian ini menganalisis kinerja empat skema modulasi, yaitu QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, pada tiga kondisi kanal komunikasi, yaitu Additive White Gaussian Noise (AWGN), Rayleigh fading, dan Rician fading. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter Bit Error Rate (BER) dan throughput pada rentang E_b/N_0 sebesar 0–20 dB. Simulasi dilakukan pada sistem tanpa pengkodean kanal dengan ekualisasi zero-forcing dan estimasi kanal sempurna, serta faktor-K Rician sebesar 6 dB. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan orde modulasi menghasilkan throughput yang lebih tinggi, tetapi menyebabkan kinerja BER semakin buruk, terutama pada kanal fading, sehingga terdapat trade-off antara efisiensi spektral dan keandalan transmisi. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan modulasi pada sistem 5G perlu mempertimbangkan kondisi kanal karena peningkatan efisiensi spektral tidak selalu menghasilkan keandalan transmisi yang lebih baik.

Kata kunci: 5G; modulasi; AWGN; Rayleigh fading; Rician fading

I. PENDAHULUAN

Teknologi komunikasi seluler generasi kelima (5G) merupakan tonggak penting dalam perkembangan sistem komunikasi nirkabel modern karena menawarkan kapasitas besar, latensi rendah, serta efisiensi spektrum yang tinggi untuk mendukung berbagai layanan dengan kebutuhan kualitas layanan (QoS) yang beragam (Andrews et al., 2014; Cai et al., 2018; Gupta & Jha, 2015). Pemanfaatan 5G memiliki peran strategis dalam mendorong transformasi digital Indonesia (Lestari et al., 2022; Mulyono et al., 2024; Supriatna et al., 2024; Trikolas et al., 2022; Trixiana & Wulandari, 2025) dan sebagai solusi peningkatan konektivitas di wilayah 3T (Komdigi, 2024). Untuk mencapai kinerja tersebut, 5G mengandalkan teknologi pada lapisan fisik salah satunya adalah modulasi orde tinggi.

Modulasi merupakan proses pemetaan sinyal informasi ke sinyal pembawa sehingga memungkinkan transmisi data secara efisien dan andal (Goldsmith, 2005). Pada sistem 5G, penggunaan modulasi orde tinggi seperti 64-QAM dan 256-QAM memungkinkan peningkatan laju data, namun berimplikasi pada meningkatnya sensitivitas terhadap gangguan kanal. Pada kondisi kanal ideal seperti AWGN, kinerja modulasi dapat dianalisis dengan relatif sederhana. Namun pada kondisi nyata, kanal propagasi bersifat multipath dan menyebabkan fading yang signifikan (Goldsmith, 2005).

Kanal multipath fading, seperti Rayleigh dan Rician fading, merepresentasikan kondisi propagasi tanpa dan dengan lintasan langsung (Simon & Alouini, 2004). Fenomena fading dapat menurunkan kualitas sinyal dan meningkatkan tingkat kesalahan bit, sehingga berdampak langsung pada kinerja sistem. Oleh karena itu, analisis kinerja modulasi pada kanal multipath fading menjadi penting untuk mengevaluasi keandalan sistem 5G secara realistis.

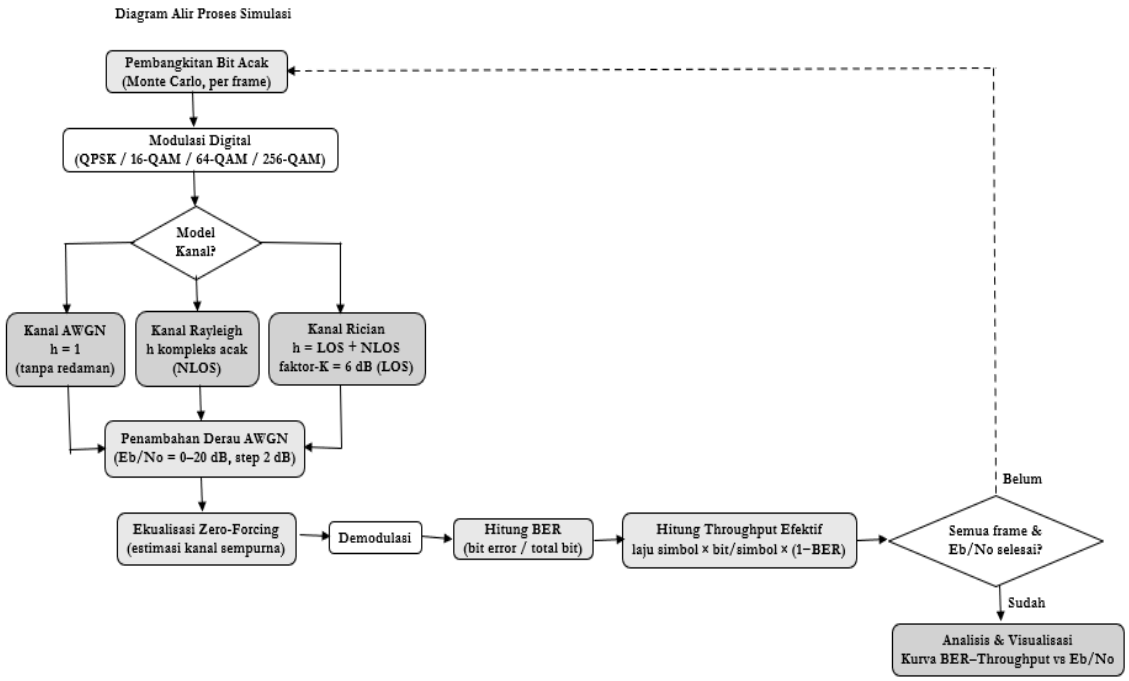
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kinerja modulasi pada sistem 5G menggunakan kanal multipath fading. Parameter kinerja yang dianalisis meliputi Bit Error Rate (BER) dan throughput.

Pendekatan pemecahan masalah dilakukan melalui pemodelan dan simulasi sistem 5G NR. Sistem diuji menggunakan kanal Rayleigh dan Rician fading. Skema modulasi digital diterapkan dan dianalisis kinerjanya berdasarkan parameter BER dan throughput pada berbagai nilai SNR.

Berbagai penelitian telah menganalisis kinerja modulasi digital pada sistem komunikasi nirkabel berbasis OFDM menggunakan kanal AWGN dan fading (Arum Dimarsasi et al., 2024; Ikhsan & Wellem, 2023; Prasetyo, 2024; Pratiwi et al., 2023). Namun, sebagian penelitian masih berfokus pada sistem non-5G atau belum memberikan analisis komparatif yang komprehensif antar orde modulasi dalam konteks sistem 5G NR. Pada penelitian (Rakhmania et al., 2023), dianalisis kinerja modulasi pada sistem komunikasi 5G, akan tetapi simulasi menggunakan kanal AWGN. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari kajian kinerja modulasi 5G NR yang sebelumnya telah menghasilkan data BER (Rakhmania et al., 2023) namun belum membedakan secara eksplisit antar model kanal, serta belum menyertakan kanal ideal sebagai pembanding maupun analisis throughput. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM pada kanal AWGN, Rayleigh, dan Rician secara terpisah, dengan parameter BER dan throughput sebagai indikator utama, sehingga diperoleh gambaran kuantitatif mengenai dampak fading serta trade-off antara efisiensi spektral dan keandalan transmisi pada sistem 5G NR.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode simulasi untuk mengevaluasi kinerja empat skema modulasi 5G NR, yaitu QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, pada tiga model kanal, yaitu AWGN, Rayleigh, dan Rician. Pada setiap iterasi, sejumlah bit acak dibangkitkan, dimodulasikan, kemudian dilewatkan pada salah satu dari tiga model kanal tersebut. Diagram alir simulasi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir simulasi

Kanal AWGN direpresentasikan sebagai kanal ideal tanpa redaman, koefisien kanal h sama dengan 1 sehingga hanya derau yang memengaruhi sinyal, sedangkan kanal Rayleigh dan Rician direpresentasikan sebagai kanal fading flat (block fading per simbol) menggunakan koefisien kanal acak kompleks, dengan kanal Rician menggunakan faktor-K sebesar 6 dB untuk merepresentasikan dominasi komponen line-of-sight. Derau Additive White Gaussian Noise (AWGN) ditambahkan pada seluruh model kanal dengan rentang Eb/No adalah 0-20 dB dengan interval 2 dB. Pada sisi penerima dilakukan ekualisasi zero-forcing dengan asumsi estimasi kanal sempurna, dilanjutkan dengan demodulasi untuk memperoleh bit hasil deteksi. Bit Error Rate (BER) dihitung sebagai rasio jumlah bit yang salah terhadap total bit yang dikirim. Perhitungan BER bisa dilihat pada persamaan 1. Throughput efektif dihitung berdasarkan laju simbol referensi 5G NR (30,72 Msps), orde modulasi, dan nilai BER yang diperoleh pada setiap titik SNR menggunakan persamaan 2. Throughput yang dihitung merupakan theoretical/effective uncoded throughput berdasarkan laju simbol referensi dan BER, sehingga tidak merepresentasikan throughput end-to-end aktual sistem 5G NR yang mempertimbangkan channel coding, cyclic-prefix overhead, reference signals, dan resource allocation.

$$BER = \frac{bit\ error}{total\ bit\ yang\ dikirim} \tag{1}$$

$$Throughput = R_s \log_2(M)\ (1 - BER) \tag{2}$$

Simulasi dilakukan menggunakan lingkungan komputasi numerik (MATLAB) dengan jumlah frame Monte Carlo yang cukup untuk memperoleh estimasi BER yang stabil pada setiap titik SNR. Parameter simulasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter simulasi

Parameter	**Nilai/ Keterangan**
Skema Modulasi	QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Model kanal	AWGN, Rayleigh fading, Rician fading
Jenis Fading	Flat fading, independent per simbol
Faktor-K kanal Rician	6 dB
Rentang Eb/No	0 – 20 dB, interval 2 dB
Jumlah bit per frame	184320 bit
Jumlah frame per titik Eb/No	50 frame
Code rate	1 (uncoded)
Metode ekualisasi	Zero-Forcing (estimasi kanal sempurna)
Laju symbol referensi	30,72 Mbps (5G NR, numerology 0)
Metode evaluasi	Simulasi monte carlo per frame
Parameter kinerja	Bit Error Rate (BER) dan Throughput

Prosedur simulasi untuk setiap skema modulasi dan model kanal diulang pada setiap nilai Eb/No dari 0 hingga 20 dB dengan interval 2 dB, yaitu sebanyak 11 titik Eb/No. Pada setiap titik dibangkitkan 50 frame yang masing-masing berisi 184.320 bit acak, sehingga total 9.216.00 bit diuji per titik. Jumlah bit per frame habis dibagi 2, 4, 6, dan 8, sehingga setiap frame terdiri atas jumlah symbol yang bulat untuk semua orde modulasi, yaitu 92.160 simbol pada QPSK, 46.080 simbol pada 16-QAM, 30.720 simbol pada 64-QAM, dan 23.040 simbol pada 256-QAM. Bit acak diubah menjadi simbol sesuai orde modulasi. Setiap simbol dipetakan ke titik konstelasi dengan daya simbol rata-rata yang sudah dinormalisasi, dikalikan dengan koefisien kanal, kemudian ditambahkan dengan derau Gaussian kompleks yang variansinya ditentukan dari nilai Eb/No dan orde modulasi.

Ekualisasi zero-forcing pada dasarnya membagi sinyal terima dengan estimasi koefisien kanal. Pendekatan ini berupaya menghilangkan pengaruh kanal secara langsung, tetapi tidak

menghilangkan derau yang telah ikut diterima. Ketika magnitudo koefisien kanal sangat kecil, operasi pembagian dapat memperbesar komponen derau. Dengan demikian, walaupun estimasi kanal diasumsikan sempurna, kanal fading tetap dapat menghasilkan kesalahan bit. Kondisi ini menjadi salah satu alasan mengapa kinerja kanal Rayleigh dan Rician tidak serta-merta sama dengan kanal AWGN setelah ekualisasi. Perbedaan karakteristik koefisien kanal tetap memengaruhi kualitas simbol yang masuk ke proses demodulasi.

Simbol hasil ekualisasi kemudian didemodulasi menggunakan skema yang sama dengan proses pemodulasian di sisi pengirim. Proses demodulasi menentukan simbol konstelasi yang paling sesuai dengan simbol terima, kemudian mengubah keputusan simbol tersebut menjadi deretan bit. Bit hasil deteksi dibandingkan dengan bit awal yang dikirimkan. Setiap bit yang nilainya berbeda dihitung sebagai bit error. Penggunaan pasangan data yang sama untuk proses perbandingan memastikan bahwa BER dihitung berdasarkan kesalahan aktual pada deretan bit yang dikirimkan dan diterima dalam satu rangkaian simulasi.

Perhitungan BER dilakukan dengan membagi jumlah bit yang salah terhadap jumlah keseluruhan bit yang diuji. Dalam satu titik Eb/N0, pengujian terdiri atas 50 frame dengan 184.320 bit pada setiap frame. Dengan demikian, jumlah total bit yang menjadi dasar perhitungan pada setiap titik Eb/N0 adalah 9.216.000 bit. Penggunaan banyak frame bertujuan memperbesar jumlah sampel yang diamati sehingga estimasi BER lebih representatif dibandingkan pengujian dengan satu frame saja. Meskipun demikian, hasil simulasi Monte Carlo tetap merupakan estimasi berdasarkan sampel acak yang digunakan, sehingga nilai BER dapat dipengaruhi oleh realisasi acak kanal dan derau.

Selain BER, penelitian ini menghitung throughput efektif berdasarkan laju simbol referensi 5G NR sebesar 30,72 Msps, jumlah bit per simbol, dan BER pada setiap titik Eb/N0. Perhitungan ini digunakan untuk memperlihatkan hubungan antara orde modulasi, kesalahan bit, dan laju data efektif secara teoritis. Semakin banyak bit yang dibawa oleh setiap simbol, semakin besar kapasitas bit sebelum memperhitungkan kesalahan. Akan tetapi, nilai BER mengurangi bagian data yang dianggap berhasil diterima. Oleh karena itu, throughput efektif tidak hanya ditentukan oleh orde modulasi, tetapi juga oleh kualitas transmisi yang direpresentasikan oleh BER. Perlu ditegaskan bahwa throughput dalam penelitian ini merupakan theoretical/effective uncoded throughput, bukan pengukuran throughput aktual pada jaringan 5G NR yang beroperasi secara end-to-end. Perhitungan belum memasukkan overhead cyclic prefix, reference signal, channel coding, kontrol, penjadwalan, maupun alokasi resource yang diterapkan pada sistem nyata. Code rate yang digunakan adalah satu atau tanpa pengkodean kanal. Pembatasan tersebut dipilih agar pengaruh skema modulasi dan model kanal dapat diamati secara lebih terarah. Dengan demikian, hasil throughput digunakan sebagai indikator perbandingan antar skenario simulasi, bukan sebagai klaim laju data aktual yang akan diperoleh pengguna jaringan 5G.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil

Simulasi dilakukan pada rentang Eb/No 0 hingga 20 dB untuk empat skema modulasi pada tiga model kanal, yaitu AWGN, Rayleigh, dan Rician. Gambar 2 menunjukkan kurva BER terhadap Eb/No untuk kanal AWGN, Rayleigh, dan Rician. Secara umum, BER menurun seiring peningkatan Eb/No pada seluruh skema modulasi dan seluruh kanal, namun laju penurunannya berbeda cukup signifikan antar model kanal.

Kanal AWGN, yang tidak mengalami redaman maupun fading, secara konsisten menghasilkan BER terendah pada seluruh skema modulasi sehingga berfungsi sebagai batas atas kinerja (upper bound). Pada Eb/No = 10 dB misalnya, modulasi QPSK pada kanal AWGN menghasilkan BER hanya $4{,}01\times10^{-6}$, jauh lebih rendah dibandingkan kanal Rician sebesar $4{,}96\times10^{-3}$ dan kanal Rayleigh sebesar $2{,}33\times10^{-2}$ pada Eb/No yang sama (Tabel 2).

Perbedaan ini menegaskan besarnya dampak fading terhadap keandalan transmisi: kanal Rician, yang memiliki komponen line-of-sight, tetap menghasilkan BER yang jauh lebih rendah dibandingkan kanal Rayleigh yang sepenuhnya non-line-of-sight. Pola serupa juga tampak pada modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Gambar 3 menunjukkan throughput efektif terhadap Eb/No; throughput meningkat seiring naiknya orde modulasi karena lebih banyak bit yang dibawa setiap simbol, meskipun disertai peningkatan BER. Pada Eb/No = 16 dB misalnya, modulasi 256-QAM pada kanal AWGN mencapai throughput tertinggi sebesar 242,72 Mbps dengan BER $1{,}24\times10^{-2}$, diikuti kanal Rician dengan throughput 239,07 Mbps dan BER $2{,}72\times10^{-2}$, sedangkan kanal Rayleigh menghasilkan throughput terendah sebesar 233,10 Mbps dengan BER tertinggi $5{,}15\times10^{-2}$ (Tabel 2).

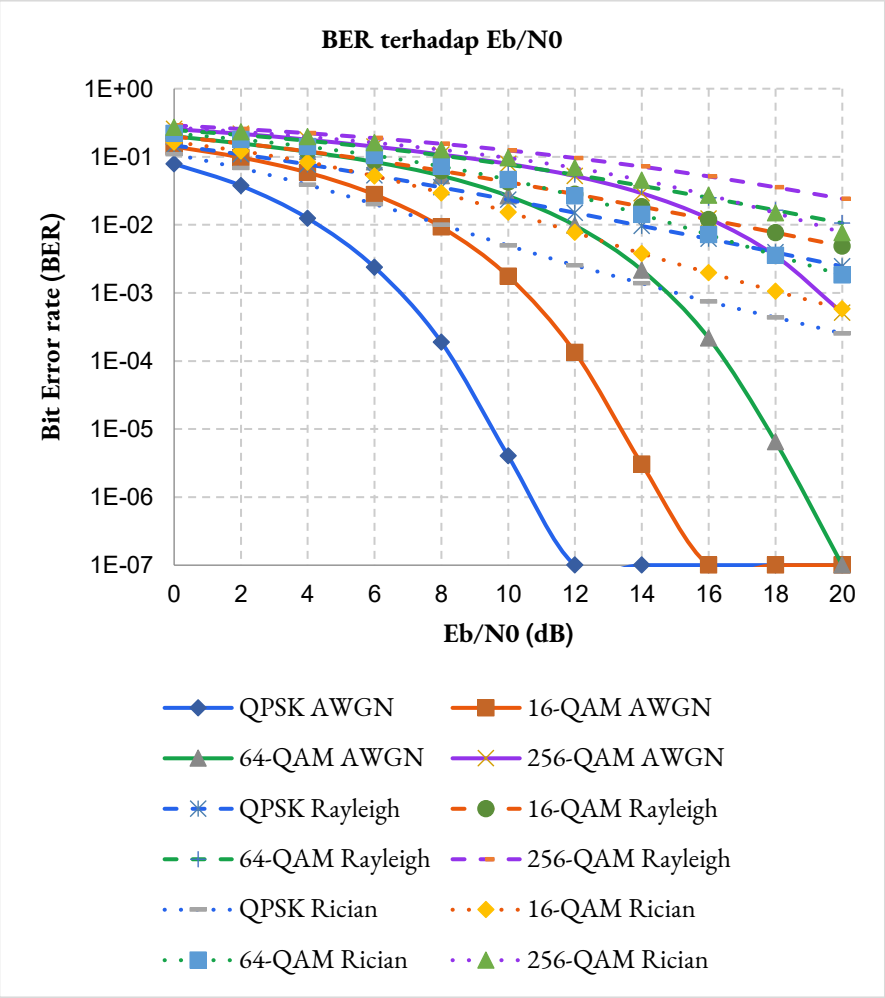
Pada AWGN, sinyal hanya dipengaruhi oleh penjumlahan derau, sehingga amplitudo dan fase simbol tidak mengalami perubahan akibat koefisien fading. Pada Rayleigh dan Rician, sinyal juga dipengaruhi oleh koefisien kanal kompleks. Akibatnya, jarak efektif antara simbol-simbol yang diterima dapat berubah dan keputusan demodulasi menjadi lebih rentan terhadap kesalahan. Walaupun penerima menggunakan ekualisasi zero-forcing, proses tersebut tidak sepenuhnya mengembalikan kondisi sinyal seperti semula karena derau yang diterima tetap ada dan dapat mengalami penguatan ketika koefisien kanal memiliki magnitudo kecil. Pada kanal AWGN, penurunan BER seiring kenaikan Eb/N0 menunjukkan bahwa peningkatan energi bit relatif terhadap derau memperbaiki kemampuan penerima dalam membedakan simbol. Pola ini tampak pada seluruh skema modulasi. Ketika Eb/N0 meningkat, gangguan derau menjadi relatif lebih kecil dibandingkan energi sinyal sehingga peluang simbol berpindah ke wilayah keputusan yang salah menurun. Nilai BER QPSK AWGN pada Eb/N0 10 dB sebesar $4{,}01\times10^{-6}$ memperlihatkan bahwa skema modulasi orde rendah memiliki ketahanan yang baik pada kondisi kanal tanpa fading. Pada 16-QAM, BER pada kondisi yang sama meningkat menjadi $1{,}75\times10^{-3}$, sedangkan 64-QAM dan 256-QAM menunjukkan nilai yang lebih tinggi.

Kecenderungan meningkatnya BER pada modulasi dengan orde lebih tinggi berkaitan dengan kerapatan titik konstelasi. Pada QPSK, jumlah titik konstelasi lebih sedikit sehingga jarak antar titik relatif lebih besar pada daya rata-rata yang sama. Penerima memiliki toleransi gangguan yang lebih besar sebelum simbol terima melewati batas keputusan. Pada 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, jumlah titik konstelasi bertambah sehingga jarak antar simbol semakin rapat. Pergeseran simbol yang disebabkan oleh derau atau fading dengan demikian lebih mudah menghasilkan keputusan simbol yang keliru. Fenomena ini menjelaskan mengapa peningkatan efisiensi spektral dapat disertai penurunan keandalan transmisi.

Pada kanal Rayleigh, pengaruh fading terlihat dari nilai BER yang lebih tinggi dibandingkan AWGN maupun Rician. Sebagai contoh, pada Eb/N0 10 dB, QPSK Rayleigh menghasilkan BER $2{,}33\times10^{-2}$. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan QPSK AWGN sebesar $4{,}01\times10^{-6}$. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan energi bit saja belum cukup untuk menghilangkan dampak variasi amplitudo kanal. Ketika terjadi pelemahan sinyal akibat kombinasi multipath, simbol yang diterima dapat memiliki kualitas lebih rendah walaupun energi bit rata-rata ditingkatkan. Akibatnya, sebagian simbol tetap berpotensi salah dideteksi. Kanal Rician memberikan hasil yang berada di antara AWGN dan Rayleigh pada skenario yang diuji. Pada Eb/N0 10 dB, BER QPSK Rician sebesar $4{,}96\times10^{-3}$, lebih tinggi daripada AWGN tetapi lebih rendah daripada Rayleigh. Keberadaan komponen LOS pada model Rician memberikan komponen sinyal yang lebih dominan dibandingkan kondisi Rayleigh yang tidak memiliki lintasan langsung dominan. Komponen tersebut membuat karakteristik sinyal terima relatif lebih stabil pada parameter yang digunakan. Namun, keberadaan LOS tidak menghilangkan seluruh pengaruh multipath dan derau, sehingga BER Rician tetap lebih besar daripada BER AWGN.

Perbandingan pada Eb/N0 16 dB menunjukkan pola yang sejalan. Untuk QPSK, BER Rayleigh sebesar $6{,}22\times10^{-3}$, sedangkan BER Rician sebesar $7{,}42\times10^{-4}$. Nilai tersebut memperlihatkan bahwa kanal Rician tetap memberikan kinerja BER lebih baik daripada Rayleigh pada kondisi energi bit yang lebih tinggi. Meskipun BER kedua kanal fading menurun dibandingkan pada Eb/N0 10 dB, keduanya masih menunjukkan pengaruh kanal yang tidak dijumpai pada model AWGN. Dengan kata lain, peningkatan Eb/N0 memperbaiki kualitas transmisi, tetapi tidak menghapus perbedaan karakteristik masing-masing kanal. Pola yang sama juga tampak pada modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Pada Eb/N0 10 dB, BER Rayleigh untuk 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM masing-masing sebesar $4{,}24\times10^{-2}$, $7{,}67\times10^{-2}$, dan $1{,}24\times10^{-1}$. Sementara itu, BER Rician pada modulasi yang sama masing-masing sebesar $1{,}54\times10^{-2}$, $4{,}60\times10^{-2}$, dan $9{,}60\times10^{-2}$. Data tersebut memperlihatkan dua kecenderungan sekaligus, yaitu peningkatan BER seiring naiknya orde modulasi dan kinerja Rician yang lebih baik dibandingkan Rayleigh pada parameter pengujian. Kedua kecenderungan tersebut konsisten dengan perbedaan kerapatan konstelasi dan karakteristik lintasan propagasi.

Pada Eb/N0 16 dB, BER 256-QAM masih relatif lebih tinggi dibandingkan skema modulasi lainnya, yaitu $1{,}24\times10^{-2}$ pada AWGN, $5{,}15\times10^{-2}$ pada Rayleigh, dan $2{,}72\times10^{-2}$ pada Rician. Hasil ini memperlihatkan bahwa modulasi 256-QAM tetap memiliki sensitivitas yang tinggi meskipun energi bit telah ditingkatkan. Pada kanal fading, pengaruh variasi amplitudo dan fase menambah tantangan proses deteksi. Oleh karena itu, penggunaan 256-QAM membutuhkan kondisi kanal yang lebih baik dibandingkan QPSK agar tingkat kesalahan bit dapat dijaga pada nilai yang lebih rendah.

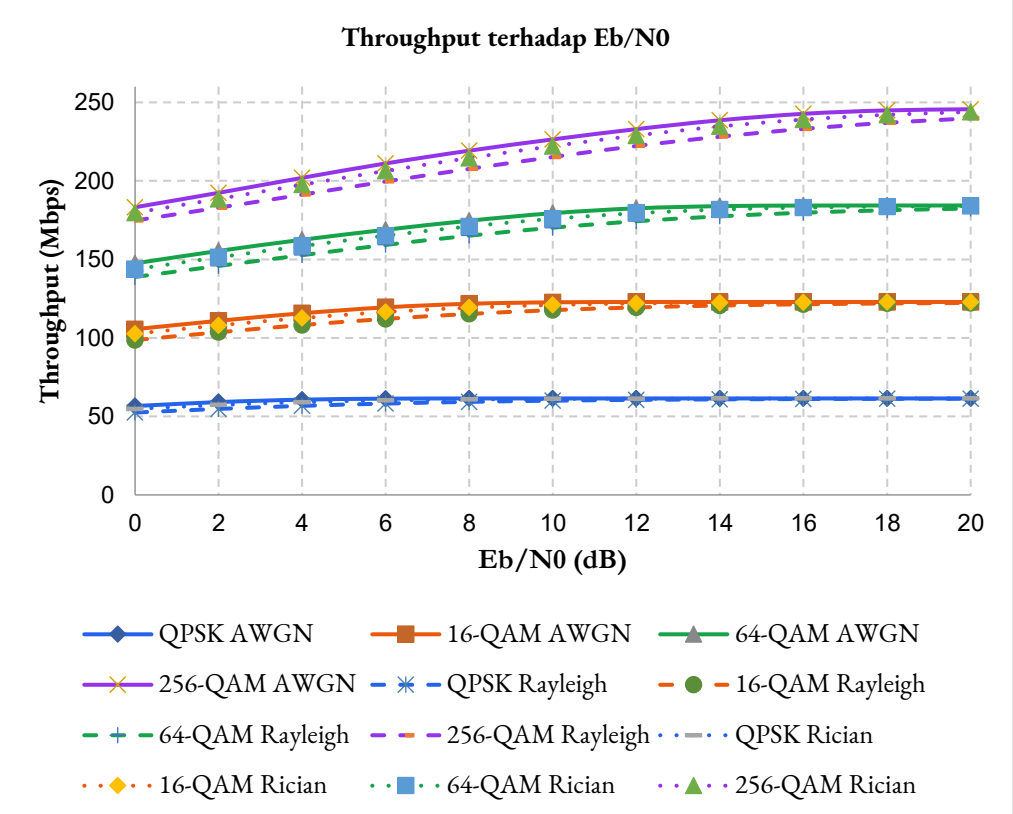


Gambar 2. Kurva BER terhadap Eb/No untuk modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 25G-QAM pada kanal AWGN, dan Rician

Tabel 2. Nilai BER dan throughput pada Eb/No = 10 dB dan 16 dB untuk kanal AWGN, Rayleigh, dan Rician

Kanal	Modulasi	BER (10 dB)	Throughput (10 dB) [Mbps]	BER (16 dB)	Throughput (16 dB) [Mbps]
AWGN	QPSK	4.01×10^{-6}	61.44	$< 1\times10^{-7}$	61.44
AWGN	16-QAM	1.75×10^{-3}	122.66	$< 1\times10^{-7}$	122.88
AWGN	64-QAM	2.65×10^{-2}	179.43	2.17×10^{-4}	184.28
AWGN	25G-QAM	7.86×10^{-2}	226.44	1.24×10^{-2}	242.72
Rayleigh	QPSK	2.33×10^{-2}	60.01	6.22×10^{-3}	61.06
Rayleigh	16-QAM	4.24×10^{-2}	117.68	1.20×10^{-2}	121.41
Rayleigh	64-QAM	7.67×10^{-2}	170.19	2.50×10^{-2}	179.72
Rayleigh	256-QAM	1.24×10^{-1}	215.21	5.15×10^{-2}	233.10
Rician	QPSK	4.96×10^{-3}	61.14	7.42×10^{-4}	61.39
Rician	16-QAM	1.54×10^{-2}	120.99	1.98×10^{-3}	122.64
Rician	64-QAM	4.60×10^{-2}	175.84	7.13×10^{-3}	183.01
Rician	25G-QAM	9.60×10^{-2}	222.16	2.72×10^{-2}	239.07

Keterangan: BER = Nilai BER $< 1\times10^{-7}$ pada grafik merupakan plotting floor yang digunakan ketika tidak terdapat bit error yang terdeteksi dalam 9.216.000 bit simulasi pada suatu titik Eb/No; nilai tersebut tidak merepresentasikan BER terukur sebesar $< 1\times10^{-7}$



Gambar 3. Throughput efektif terhadap Eb/No untuk modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM pada kanal AWGN, Rayleigh, dan Rician.

Kurva throughput memperlihatkan kecenderungan yang berbeda dari kurva BER. Pada nilai Eb/N0 yang sama, modulasi dengan orde lebih tinggi secara umum menghasilkan throughput efektif lebih besar karena setiap simbol membawa lebih banyak bit informasi. QPSK membawa dua bit per simbol, sedangkan 256-QAM membawa delapan bit per simbol.

Perbedaan jumlah bit tersebut membuat throughput teoretis 256-QAM memiliki potensi paling tinggi. Akan tetapi, peningkatan throughput tersebut harus dibaca bersama nilai BER karena laju data yang lebih tinggi tidak otomatis berarti seluruh bit berhasil diterima dengan benar.

Contoh yang terlihat pada Eb/N0 16 dB adalah throughput 256-QAM pada kanal AWGN sebesar 242,72 Mbps, pada kanal Rician sebesar 239,07 Mbps, dan pada kanal Rayleigh sebesar 233,10 Mbps. Urutan tersebut sejalan dengan urutan BER, yaitu AWGN menghasilkan BER paling rendah, Rician berada di posisi berikutnya, dan Rayleigh menghasilkan BER paling tinggi. Selisih throughput terjadi karena perhitungan throughput efektif memperhitungkan BER selain jumlah bit per simbol. Dengan demikian, kualitas kanal ikut memengaruhi laju data efektif yang dihitung meskipun orde modulasi yang digunakan sama.

Pada modulasi QPSK, perbedaan throughput antar kanal relatif lebih kecil dibandingkan perbedaan yang terlihat pada modulasi orde tinggi. Pada Eb/N0 16 dB, throughput QPSK AWGN sebesar 61,44 Mbps, Rician sebesar 61,39 Mbps, dan Rayleigh sebesar 61,06 Mbps. Nilai-nilai tersebut berdekatan karena jumlah bit per simbol QPSK lebih rendah dan BER yang diperoleh pada titik tersebut juga relatif kecil. Pada orde modulasi yang lebih tinggi, pengaruh BER terhadap throughput menjadi lebih terlihat karena jumlah bit yang dibawa setiap simbol lebih besar dan tingkat kesalahan yang terjadi juga cenderung meningkat.

Perbandingan nilai pada Eb/N0 10 dB dan 16 dB juga menunjukkan bahwa peningkatan Eb/N0 tidak selalu menghasilkan kenaikan throughput dengan besaran yang sama untuk setiap modulasi dan kanal. Ketika BER sudah sangat kecil, throughput efektif mendekati nilai maksimum yang ditentukan oleh laju simbol dan jumlah bit per simbol. Sebaliknya, ketika BER masih cukup tinggi, pengurangan akibat kesalahan bit menjadi lebih besar. Oleh sebab itu, perubahan throughput pada rentang Eb/N0 tertentu bergantung pada posisi BER masing-masing skenario, bukan hanya pada kenaikan Eb/N0 secara langsung.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan skema modulasi tidak dapat hanya didasarkan pada throughput tertinggi. Jika tujuan utama adalah meningkatkan jumlah bit yang dibawa setiap simbol, modulasi 256-QAM memberikan potensi paling besar. Namun, ketika kondisi kanal mengalami fading atau Eb/N0 relatif rendah, peningkatan BER dapat menjadi pertimbangan penting. QPSK memiliki efisiensi spektral yang lebih rendah, tetapi memberikan jarak konstelasi yang lebih besar dan ketahanan deteksi yang lebih baik. Dengan demikian, setiap skema modulasi memiliki kondisi penggunaan yang berbeda bergantung pada prioritas antara laju data dan keandalan.

Dari sisi evaluasi, penggunaan kanal AWGN, Rayleigh, dan Rician secara terpisah memberikan pembanding bertingkat. Pada kanal AWGN, sinyal hanya mengalami pengaruh derau tanpa adanya variasi amplitudo akibat fading. Kondisi tersebut membuat proses penerimaan dan deteksi simbol relatif lebih stabil dibandingkan kanal fading. Akibatnya, nilai BER yang diperoleh pada kanal AWGN cenderung lebih rendah sehingga throughput efektif yang dihasilkan lebih tinggi. Berbeda dengan AWGN, kanal Rayleigh mengalami fading akibat penerimaan sinyal dari berbagai lintasan tanpa adanya komponen lintasan langsung yang dominan. Perubahan amplitudo sinyal akibat fading dapat meningkatkan kemungkinan kesalahan deteksi simbol, sehingga BER menjadi lebih tinggi dan throughput efektif mengalami penurunan. Sementara itu, kanal Rician memiliki komponen lintasan langsung atau line-of-sight (LOS) selain komponen lintasan tidak langsung. Keberadaan komponen LOS tersebut membantu menjaga kestabilan sinyal sehingga kinerja kanal Rician cenderung lebih baik dibandingkan kanal Rayleigh pada parameter simulasi yang digunakan. Hasil AWGN tidak dimaksudkan untuk menggambarkan kondisi jaringan nyata secara keseluruhan, melainkan sebagai acuan ideal untuk menilai seberapa besar degradasi yang muncul ketika pengaruh kanal fading dimasukkan ke dalam simulasi.

Perlu diperhatikan bahwa nilai BER dan throughput pada penelitian ini bergantung pada asumsi model yang digunakan. Kanal fading dimodelkan sebagai flat fading yang independen per simbol, estimasi kanal diasumsikan sempurna, dan ekualisasi menggunakan zero-forcing. Sistem juga tidak menggunakan pengkodean kanal. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh tidak memasukkan keuntungan koreksi kesalahan dari channel coding maupun kerugian akibat kesalahan estimasi kanal. Pembatasan tersebut membuat analisis lebih terfokus pada pengaruh skema modulasi dan jenis kanal, tetapi sekaligus membatasi penerapan angka hasil secara langsung pada jaringan 5G NR komersial.

Asumsi flat fading berarti seluruh komponen frekuensi dalam satu simbol mengalami pengaruh kanal yang direpresentasikan oleh satu koefisien kanal. Model ini lebih sederhana dibandingkan kanal frequency-selective yang dapat memberikan respons berbeda pada komponen frekuensi yang berbeda. Selain itu, koefisien kanal yang independen per simbol membuat setiap simbol dapat mengalami realisasi fading yang berbeda. Pendekatan ini digunakan untuk mengamati dampak variasi kanal terhadap deteksi simbol tanpa menambahkan kompleksitas pemodelan kanal yang lebih rinci.

Penggunaan estimasi kanal sempurna juga perlu menjadi pertimbangan dalam membaca hasil. Dalam sistem nyata, penerima perlu memperkirakan karakteristik kanal berdasarkan sinyal referensi atau pilot. Estimasi yang tidak sempurna dapat menyebabkan proses ekualisasi tidak sepenuhnya mengoreksi perubahan kanal. Karena penelitian ini mengasumsikan estimasi sempurna, degradasi BER yang ditampilkan terutama berasal dari karakteristik fading, derau, dan keterbatasan jarak konstelasi modulasi. Penelitian lanjutan dapat memasukkan estimasi kanal yang lebih realistis untuk mengetahui tambahan pengaruh kesalahan estimasi terhadap kinerja.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menguatkan bahwa hubungan antara BER dan throughput perlu dianalisis secara bersamaan. BER memberikan informasi mengenai proporsi bit yang mengalami kesalahan, sedangkan throughput efektif menggambarkan laju data yang diperkirakan berhasil dipertahankan berdasarkan model perhitungan penelitian. Jika hanya throughput yang diamati, modulasi orde tinggi dapat terlihat selalu lebih unggul. Namun, ketika BER turut diperhitungkan, terlihat bahwa keuntungan laju data tersebut disertai risiko kesalahan yang lebih besar. Analisis dua parameter ini memberikan gambaran yang lebih seimbang mengenai kinerja sistem modulasi 5G NR

B. Diskusi

Hasil simulasi memperlihatkan urutan kinerja yang konsisten dengan teori: kanal AWGN selalu memberikan BER terendah karena tidak ada redaman sinyal, diikuti kanal Rician, dan kanal Rayleigh dengan BER tertinggi. Selisih BER antara kanal AWGN dan kedua kanal fading sangat besar, terutama pada modulasi orde rendah (QPSK dan 16-QAM), yang menegaskan bahwa fading merupakan faktor dominan penurun kinerja dibandingkan derau termal semata. Sementara itu, keunggulan kanal Rician atas Rayleigh konsisten dengan temuan penelitian sebelumnya bahwa komponen line-of-sight memberikan daya sinyal dominan dan lebih stabil (Sabuncu & Bilgehan, 2025). Selisih BER antara Rayleigh dan Rician semakin terlihat jelas pada Eb/No rendah hingga menengah. Pada Eb/No yang semakin tinggi, BER seluruh kanal mengalami penurunan. Namun, kanal fading tetap menunjukkan degradasi dibandingkan AWGN karena variasi amplitudo kanal masih memengaruhi proses deteksi, terutama pada Rayleigh fading. Dari sisi pemilihan modulasi, hasil ini menegaskan adanya trade-off klasik antara efisiensi spektral dan keandalan: modulasi orde tinggi seperti 256-QAM cocok digunakan pada kondisi kanal yang baik (Eb/No tinggi, minim fading) untuk memaksimalkan throughput, sedangkan modulasi orde rendah seperti QPSK lebih andal digunakan pada kondisi kanal buruk (NLOS, Eb/No rendah) meskipun throughput yang dihasilkan lebih kecil. Temuan ini relevan dengan mekanisme adaptive modulation and coding

(AMC) pada sistem 5G NR, di mana skema modulasi dipilih secara dinamis berdasarkan kondisi kanal yang dilaporkan melalui Channel Quality Indicator (CQI) (Rinaldi et al., 2021).

Selain pengaruh jenis kanal dan orde modulasi terhadap BER, hasil throughput juga memperlihatkan pentingnya mempertimbangkan efisiensi pengiriman data dalam mengevaluasi kinerja sistem 5G NR. Berdasarkan hasil simulasi, peningkatan orde modulasi memberikan kenaikan throughput yang cukup konsisten pada seluruh model kanal. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah bit yang dapat direpresentasikan dalam setiap simbol menjadi salah satu faktor utama yang menentukan kapasitas pengiriman informasi. Namun, peningkatan tersebut tidak dapat dipisahkan dari karakteristik penerimaan sinyal. Ketika orde modulasi semakin tinggi, penerima harus membedakan lebih banyak titik konstelasi yang jaraknya semakin berdekatan. Akibatnya, gangguan yang terjadi selama proses transmisi dapat memberikan pengaruh lebih besar terhadap ketepatan deteksi simbol.

Perbedaan throughput antarjenis kanal juga menunjukkan bahwa kualitas propagasi tidak hanya berpengaruh terhadap tingkat kesalahan bit, tetapi turut memengaruhi laju data efektif. Pada Eb/N0 sebesar 16 dB, selisih throughput antara kanal AWGN dan Rayleigh pada modulasi QPSK hanya sebesar 0,38 Mbps. Sementara itu, pada modulasi 256-QAM, selisihnya meningkat menjadi 9,62 Mbps. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa pengaruh fading menjadi semakin terlihat ketika sistem menggunakan modulasi dengan orde tinggi. Hal ini berkaitan dengan sensitivitas konstelasi modulasi terhadap perubahan amplitudo dan fase akibat multipath. Dengan demikian, penggunaan modulasi orde tinggi membutuhkan kualitas kanal yang lebih baik agar keuntungan throughput yang diperoleh dapat dipertahankan.

Jika diamati berdasarkan perubahan Eb/N0, peningkatan kualitas sinyal secara umum memberikan peluang bagi sistem untuk menghasilkan throughput efektif yang lebih tinggi. Pada nilai Eb/N0 rendah, pengaruh derau dan fading menyebabkan lebih banyak bit mengalami kesalahan sehingga throughput efektif belum mencapai nilai maksimumnya. Ketika Eb/N0 meningkat, BER cenderung menurun dan throughput dapat mendekati kapasitas berdasarkan jumlah bit per simbol dan laju simbol yang digunakan. Meskipun demikian, peningkatan throughput tidak selalu berlangsung dengan besaran yang sama pada setiap skema modulasi. Hal ini karena masing-masing modulasi memiliki karakteristik konstelasi dan sensitivitas yang berbeda terhadap gangguan. Modulasi orde rendah cenderung lebih cepat mencapai kondisi penerimaan yang andal, sedangkan modulasi orde tinggi membutuhkan kondisi kanal yang lebih mendukung.

Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa perbandingan throughput perlu dilakukan dengan memperhatikan nilai BER pada kondisi pengujian yang sama. Sebagai contoh, modulasi 256-QAM menghasilkan throughput tertinggi pada ketiga kanal, tetapi hasil BER menunjukkan bahwa modulasi tersebut juga memiliki tingkat kesalahan yang relatif lebih besar dibandingkan QPSK. Artinya, peningkatan kapasitas pengiriman informasi tidak secara otomatis menunjukkan peningkatan keandalan sistem. Dalam penerapan komunikasi nirkabel, kondisi ini menjadi pertimbangan penting karena sistem tidak hanya dituntut mengirimkan data dalam jumlah besar, tetapi juga memastikan informasi yang diterima memiliki tingkat kesalahan yang dapat ditoleransi.

Perlu diperhatikan pula bahwa nilai throughput yang diperoleh merupakan hasil perhitungan berdasarkan laju simbol referensi, orde modulasi, dan BER pada sistem tanpa pengkodean kanal. Oleh sebab itu, hasil tersebut lebih tepat digunakan untuk membandingkan kecenderungan kinerja antarjenis modulasi dan kanal dalam kondisi simulasi yang telah ditentukan. Pada implementasi 5G NR, throughput aktual juga dipengaruhi oleh faktor lain, seperti skema pengkodean kanal, alokasi resource block, overhead cyclic prefix, sinyal referensi, serta kondisi penjadwalan pengguna. Faktor-faktor tersebut belum dimodelkan dalam penelitian ini sehingga nilai throughput yang diperoleh belum menggambarkan keseluruhan proses pengiriman data pada jaringan 5G NR.

Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan throughput perlu diimbangi dengan pertimbangan terhadap keandalan transmisi dan karakteristik kanal propagasi. Penggunaan modulasi orde tinggi memberikan keuntungan dari sisi kapasitas pengiriman data, tetapi membutuhkan kondisi kanal yang lebih baik agar tingkat kesalahan bit tetap terkendali. Perbandingan antara AWGN, Rayleigh, dan Rician memberikan gambaran mengenai bagaimana perubahan kondisi propagasi memengaruhi kinerja tersebut. Hasil ini memperkuat bahwa evaluasi sistem komunikasi 5G NR sebaiknya tidak hanya didasarkan pada satu parameter, melainkan menggabungkan throughput dan BER untuk memperoleh penilaian kinerja yang lebih menyeluruh.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis kinerja modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM pada sistem 5G NR di bawah kanal AWGN, Rayleigh, dan Rician menggunakan parameter BER dan throughput. Hasil simulasi menunjukkan urutan kinerja yang konsisten dengan teori, yaitu kanal AWGN memberikan BER terendah sebagai batas atas ideal, diikuti kanal Rician yang unggul dibandingkan kanal Rayleigh berkat keberadaan komponen line-of-sight, pada seluruh skema modulasi yang diuji, sementara throughput meningkat seiring naiknya orde modulasi dengan konsekuensi BER yang lebih tinggi. Temuan ini menegaskan besarnya dampak fading terhadap keandalan transmisi serta perlunya strategi pemilihan modulasi yang adaptif terhadap kondisi kanal untuk mengoptimalkan keseimbangan antara efisiensi spektral dan keandalan transmisi pada sistem 5G NR.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Jenderal Soedirman atas dukungan pendanaan melalui skema Riset Peningkatan Kompetensi (RPK) 2026 dengan nomor kontrak 13.596/UN23.34/PT.01.00/IV/2026 yang memungkinkan terlaksananya penelitian ini.

REFERENCES

Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C. K., & Zhang, J. C. (2014). What Will 5G Be? *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *32*(6), 1065–1082. https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098

Arum Dimarsasi, I., Saptono, R., & Syirajjudin, M. (2024). Performance Analysis of OFDM under AWGN and Rayleigh Fading Channels Based on Software Defined Radio. *Jurnal EECCIS (Electrics, Electronics, Communications, Controls, Informatics, Systems)*, *18*(3), 80–85. https://doi.org/10.21776/jeeccis.v18i3.1748

Cai, Y., Qin, Z., Cui, F., Li, G. Y., & McCann, J. A. (2018). Modulation and Multiple Access for 5G Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, *20*(1), 629–646. https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2766698

Goldsmith, A. (2005). *Wireless Communications* (1st ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511841224

Gupta, A., & Jha, R. K. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. *IEEE Access*, *3*, 1206–1232. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2461602

Ikhsan, D. M., & Wellem, T. (2023). SIMULASI SKEMA MODULASI 1024-QAM DAN 4096-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI DIGITAL. *Jurnal Indonesia :*

Manajemen Informatika dan Komunikasi, *4*(3), 1356–1364. https://doi.org/10.35870/jimik.v4i3.321

Komdigi, P. (2024). Tingkatkan Konektivitas Daerah 3T, Kominfo Kaji Optimalkan 5G [Web Page]. *Tingkatkan Konektivitas Daerah 3T, Kominfo Kaji Optimalkan 5G*. https://www.komdigi.go.id/berita/pengumuman/detail/tingkatkan-konektivitas-daerah-3t-kominfo-kaji-optimalkan-5g

Lestari, M. A., Ramli, A. M., & Ramli, T. S. (2022). TELAAH YURIDIS PENYELENGGARAAN TEKNOLOGI 5G DI INDONESIA: LANGKAH TRANSFORMASI MENUJU ERA SOCIETY 5.0. *Citizen : Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia*, *2*(1), 129–137. https://doi.org/10.53866/jimi.v2i1.49

Mulyono, B., Rachman, A., Rahayu, N., Eldo, H., & Nuryanto, U. W. (2024). Analisis Dampak Implementasi Teknologi 5G terhadap Infrastruktur Jaringan di Indonesia. *Jurnal Minfo Polgan*, *13*(2), 1462–1467. https://doi.org/10.33395/jmp.v13i2.14103

Prasetyo, Y. P. W. (2024). *SIMULASI SISTEM MENGGUNAKAN MODULASI DIGITAL 4-QAM,8-QAM MELALUI KANAL FADING YANG TERDISTRIBUSI RAYLEIGH DAN AWGN*. *7*. https://jurnal.umsb.ac.id/index.php/RANGTEKNIKJOURNAL/article/viewFile/4304/3439

Pratiwi, W., Setyowati, E., & Pratama, H. P. (2023). *ANALISIS KINERJA OFDM DAN UFMC DENGAN MODULASI 64- QAM DAN 256-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI 5G*. *10*(2). http://repository.upi.edu/id/eprint/101220

Rakhmania, A. E., Harvinanda, A. M., & Taufik, M. (2023). *Analisis Kinerja Sistem Modulasi Downlink LTE dan 5G pada Kanal AWGN*. *22*(2). https://doi.org/10.31358/techne.v22i2.341

Rinaldi, F., Raschellà, A., & Pizzi, S. (2021). 5G NR system design: A concise survey of key features and capabilities. *Wireless Networks*, *27*(8), 5173–5188. https://doi.org/10.1007/s11276-021-02811-y

Sabuncu, Ö., & Bilgehan, B. (2025). Novel Statistical Modelling and Optimization Techniques of Fading Channel Coefficients for 5G Network Performance. *Journal of Network and Systems Management*, *33*(2), 42. https://doi.org/10.1007/s10922-025-09905-4

Simon, M. K., & Alouini, M. (2004). *Digital Communication over Fading Channels* (1st ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/0471715220

Supriatna, E., Qadri, M. Z., Haviana, E., Dani, A., Quin, A. N., & Alisyahbana, A. (2024). *Peran Teknologi 5G dalam Mendorong Pertumbuhan Ekonomi Digital dan Transformasi Industri*.https://al-haramjournal.co.id/J-CEKI/article/view/4103/3235

Trikolas, T., Sungkowo, A., Al Hakim, R. R., & Jaenul, A. (2022). Kelebihan, Kekurangan, Peluang Teknologi 5G di Indonesia. *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, *1*(1), 43–49. https://doi.org/10.55123/insologi.v1i1.145

Trixiana, W., & Wulandari, S. (2025). *Implementasi Teknologi Jaringan Nirkabel 5G untuk Optimalisasi Kinerja Komunikasi Data*. https://ejournal.omahtabing.com/knj/article/view/33