

Studi Komparatif Modulasi M-QAM dan QPSK pada Jaringan 4G-LTE

Cahyani Pebriyanti, Nabilah Lestari, Nur Asyiyah, Endah Setyowati*,
Khanzademma Qeisha Pynda, Daffa' Sami Nasrulloh, Daryan Pratama Alifi
Department of Telecommunications Systems, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia

Article Info

Article history:

Submitted December 10, 2023

Accepted January 9, 2024

Published February 1, 2024

Keywords:

Modulasi Jaringan 4G LTE,
M-QAM,
QPSK,
nilai *throughput*

4G LTE Network Modulation,
M-QAM,
QPSK,
throughput value

ABSTRACT

Kemajuan teknologi telekomunikasi, khususnya jaringan 4G atau LTE (*Long Term Evolution*), telah mengubah dunia komunikasi seluler secara signifikan. Namun, dengan meningkatnya penggunaan layanan 4G LTE sering kali diikuti oleh gangguan sinyal yang cukup mengganggu. Studi ini menggunakan metode *literature review* dengan menggali data yang ada sebelumnya, diikuti dengan analisis dan eksplanasi rinci untuk melengkapi penelitian sebelumnya. Penelitian ini berfokus pada berbagai tingkat modulasi, termasuk QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Parameter utama yang diamati adalah *throughput*, yang merupakan ukuran utama untuk mengevaluasi efisiensi teknik pengiriman data dalam berbagai kondisi. Hasilnya menunjukkan bahwa modulasi tingkat tinggi, seperti 256-QAM dan 64-QAM, menunjukkan nilai *throughput* yang lebih tinggi dibandingkan dengan modulasi QPSK. Diharapkan bahwa penelitian ini akan memberikan gambaran umum tentang hubungan antara modulasi dan teknologi 4G LTE.

Advances in telecommunications technology, particularly 4G or LTE (Long Term Evolution) networks, have significantly changed the world of mobile communications. However, the increasing use of 4G LTE services is often followed by disruptive signal interference. This study utilizes the literature review method by mining existing data, followed by detailed analysis and explanation to complement previous research. This study focuses on various modulation levels, including QPSK, 16-QAM, 64-QAM, and 256-QAM. The main parameter observed is throughput, which is the primary measure for evaluating the efficiency of data delivery techniques under various conditions. The results show that high-level modulations, such as 256-QAM and 64-QAM, exhibit higher throughput values compared to QPSK modulation. It is hoped that this research will provide an overview of the relationship between modulation and 4G LTE technology.



Corresponding Author:

Endah Setyowati

Department of Telecommunications Systems, Universitas Pendidikan Indonesia

Jl. Dr. Setiabudhi No. 229 Bandung 40154, Jawa Barat - Indonesia.

Email: *endahsetyowati@upi.edu

1. PENDAHULUAN

Sistem telekomunikasi seluler telah menjadi salah satu kebutuhan pokok dalam kehidupan sehari-hari bagi masyarakat modern. Permintaan alat komunikasi dan media informasi terus meningkat [1]. Sistem nirkabel terus tumbuh dan berevolusi untuk mengakomodasi kebutuhan lalu lintas yang meningkat melalui penerapan jaringan 4G LTE. ITU – *Radio communication* (ITU-R) mendefinisikan sistem seluler generasi keempat, mengacu pada teknologi LTE-Advanced, namun LTE secara luas dikenal sebagai 4G [2]. Menurut badan standar IEEE 802.16, LTE (*Long Term Evolution*) adalah sistem komunikasi seluler yang dikembangkan oleh proyek kerja sama 3 GPP (*Third Generation Partnership Project*), dan WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) [3]. Ini merupakan teknologi bersifat nirkabel yang membantu komunikasi seluler berkecepatan tinggi. LTE adalah pengembangan atau evolusi dari teknologi UMTS (3G) dan HSDPA (3,5G) [4]. Teknologi ini memiliki kecepatan *uplink* 50 Mbps dan *downlink* 100 Mbps [2]. Selain itu, LTE diciptakan untuk memperbaiki teknologi sebelumnya dan dapat mendukung semua aplikasi yang ada, seperti *voice*, data, video, dan IP TV [4]. LTE dapat meningkatkan *coverage*, kapasitas, dan layanan, mengurangi biaya operasional, mendukung penggunaan lebih dari satu antena, dan fleksibel dalam penggunaan *bandwidth*.

Banyak *interferensi* yang disebabkan oleh peningkatan kapasitas pengguna saat ini. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan penggunaan metode modulasi [5]. Modulasi adalah perubahan gelombang periodik untuk membawa data atau informasi [6]. Informasi dengan frekuensi yang rendah akan dimasukkan ke dalam gelombang pembawa, yang biasanya berupa gelombang sinusoidal dengan frekuensi tinggi [7]. Modulasi yang memungkinkan dapat digunakan untuk pengiriman data yang lebih banyak untuk *bandwidth* yang sama, secara langsung dapat berkontribusi untuk peningkatan kualitas pada segi kapasitas jaringan tanpa harus memerlukan pertambahan signifikan terhadap spektrum yang tersedia [5]. Pada jaringan yang memiliki penggunaan spektrum yang terbatas, efisiensi pada modulasi menjadi parameter yang sangat penting untuk memenuhi tuntutan pengguna layanan yang semakin meningkat. Saat ini kecenderungan sistem komunikasi mengarah pada sistem komunikasi digital baik teknik pengkodean maupun transmisi [7]. Hal ini karena teknologi digital memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan teknologi analog. Beberapa keuntungannya adalah kemudahan penyimpanan, ketahanan yang lebih baik terhadap gangguan, dan kemampuan transmisi data dengan kapasitas yang lebih besar pada *bandwidth* saluran yang terbatas [7]. Dengan menggunakan modulasi digital, sinyal data dapat diformat sesuai untuk transmisi nirkabel. Selain itu, untuk menjamin optimalisasi efisiensi spektrum frekuensi dalam sistem komunikasi modern, pemilihan modulasi yang efektif dan efisien sangat penting. Begitu pun dengan adanya peningkatan pada *throughput* menjadi aspek yang sangat penting, karena pengguna akan mendapatkan segi layanan jaringan seluler yang berkualitas.

Dalam modulasi digital, terdapat beberapa teknik modulasi yang umum digunakan, meliputi: *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), *Phase Shift Keying* (PSK), *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK) [6]. Namun pada penelitian ini hanya mencakup pengambilan sampel modulasi digital QPSK, 16-QAM, 64-QAM dan 256-QAM. Semua modulasi tersebut (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM) merepresentasikan tingkat kecepatan transfer data yang berbeda dalam jaringan 4G. Dengan membandingkan modulasi tersebut, peneliti dapat memahami bagaimana perbedaan dalam tingkat modulasi ini mempengaruhi *throughput* (jumlah data yang berhasil ditransfer dalam satu unit waktu).

Literatur sebelumnya telah menggarisbawahi pentingnya modulasi digital dalam jaringan seluler. Pada penelitian *Effect of Modulation on Throughput of 4G LTE Network Frequency 1800 MHz* [8]. Penelitian tersebut membahas pengaruh modulasi terhadap *throughput* pada jaringan 4G LTE. Adapun memuat modulasi meliputi QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Dengan menggunakan metode *drive test* untuk mengumpulkan data di lapangan, hasil menunjukkan bahwa modulasi 64-QAM memiliki nilai *throughput* yang paling tinggi dibandingkan dengan QPSK dan 16-QAM [8]. Modulasi dibahas juga pada penelitian Analisis Unjuk kerja Jaringan *Microcell* LTE Berdasarkan, Variasi Level Modulasi [5], penelitian ini telah menggaris bawahi pengaruh modulasi pada parameter-parameter seperti RSRP, CINR, BER, dan *throughput* pada jaringan 4G LTE. Hasil menunjukkan bahwa modulasi 256-QAM memiliki nilai *throughput* yang paling tinggi [5].

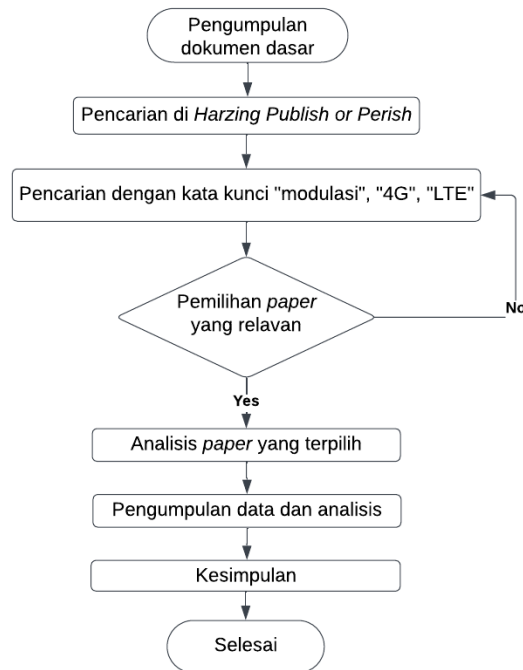
Dalam penelitian lain yang berjudul Analisis Implementasi *Open RAN* pada Jaringan 2G dan 4G di Frekuensi 900 MHz [9], tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi penerapan teknologi *Open RAN* pada jaringan 2G dan 4G di frekuensi 900 MHz. Penelitian tersebut menghitung *link budget*, dimensi kapasitas, dan *bandwidth throughput* e-Node B. Penelitian ini menemukan bahwa modulasi 256-QAM memiliki *throughput* yang lebih besar daripada modulasi jenis lain. Lalu pada penelitian yang berjudul *Performance Analysis on Throughput in 4G Network in Digital Environment with SISO Technique* [9]. Penelitian ini menunjukkan pengaruh besar dari teknik modulasi terhadap *throughput* dalam jaringan 4G. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa modulasi 64-QAM menghasilkan *throughput* tertinggi sebesar 36,696 Mbps. Temuan ini menggarisbawahi hubungan langsung antara tingkat modulasi yang lebih tinggi dengan peningkatan signifikan pada *throughput*. Selain itu, penelitian ini menyoroti bahwa tingkat *throughput* juga dipengaruhi oleh ketersediaan infrastruktur jaringan dalam menentukan kualitas sinyal dan *throughput* dalam lingkungan. Keseluruhan penelitian tersebut memberikan analisis penting, namun pemahaman mengenai parameter *throughput* masih memerlukan penelitian yang lebih lanjut. Hubungan penting antara tingkat modulasi dan *throughput* sangat penting untuk menentukan efisiensi dan kapasitas sebenarnya dari jaringan LTE. Oleh karena itu, untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik, analisis yang lebih mendalam berdasarkan data simulasi yang telah tersedia diperlukan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *studi literature review* dengan fokus pada analisis penelitian terdahulu. Tujuan dari metode ini adalah untuk mensintesis data dan informasi dari penelitian sebelumnya, memperluas pemahaman saat ini, dan mengembangkan kerangka kerja baru untuk melengkapi dan meningkatkan apa yang sudah diketahui. Proses analisis ini dimaksudkan untuk memberikan pemahaman yang lebih baik. Penelitian ini dianggap sebagai kontribusi yang berharga untuk melengkapi dan mengklarifikasi temuan penelitian sebelumnya. Informasi dan data dari berbagai artikel sebelumnya diintegrasikan dalam proses penelitian ini, agar membuat temuan yang ada dan akan menghasilkan kesimpulan yang lebih luas. Metode ini tidak hanya memungkinkan penyatuan data dari berbagai sumber, tetapi juga memungkinkan pemahaman yang

telah ada diperluas dan diperdalam. Maka dari itu tujuan dari langkah-langkah analisis yang dilakukan adalah untuk menghasilkan kerangka kerja baru, memberikan kontribusi signifikan untuk kemajuan pengetahuan di bidang ini, dan menjadikan penelitian ini sebagai landasan yang kuat untuk melengkapi dan mengklarifikasi hasil penelitian sebelumnya.

Gambar 1 adalah *flowchart* yang menggambarkan langkah-langkah mengidentifikasi nilai *throughput*.



Gambar 1. *Flowchart* pengerjaan identifikasi nilai *throughput*

Berikut merupakan garis besar mekanisme yang dilakukan.

2.1 Pengumpulan Dokumen Dasar atau Studi Literatur

Pada tahap awal, proses pengumpulan dokumen dasar atau studi literatur dilakukan dengan menganalisis beberapa artikel yang relevan. Tahap ini penting untuk menemukan literatur yang relevan dan mendukung argumen atau penelitian yang sedang dilakukan. Dengan melakukan studi literatur dari beberapa *paper* yang sesuai, ini juga merupakan proses kritis yang memainkan peran penting dalam menemukan literatur yang relevan dan mendukung argumen atau riset yang dilakukan.

2.2 Pencarian di Harzing Publish or Perish

Langkah berikutnya adalah melakukan pencarian menggunakan alat atau platform seperti *Harzing Publish or Perish*. Platform ini membantu menemukan literatur terkait dengan menggunakan kata kunci modulasi digital, seperti 4G LTE, yang kemudian menjadi dasar untuk penelitian lebih lanjut.

2.3 Pencarian dengan Kata Kunci Modulasi Digital, 4G LTE

Langkah berikutnya adalah melakukan pencarian yang lebih khusus dengan kata kunci yang tepat terkait modulasi digital, 4G LTE, untuk mendapatkan literatur yang relevan. Pilihan literatur ini kemudian menjadi fokus analisis lebih lanjut.

2.4 Pemilihan *Paper* yang Relevan

Setelah proses pencarian, literatur atau *paper* yang dianggap relevan dipilih untuk dianalisis lebih lanjut. Langkah ini penting untuk menyaring sumber daya atau informasi yang relevan dan penting bagi penelitian ini, dan memfokuskan perhatian pada kualitas dan relevansi informasi yang akan menjadi dasar analisis mendalam terkait pemilihan modulasi dan pengaruhnya terhadap nilai *throughput* dalam konteks teknologi 4G LTE.

2.5 Analisis *Paper* yang Terpilih

Pada langkah ini, data dari literatur yang dipilih dikumpulkan dan dianalisis. Analisis berfokus pada nilai *throughput* untuk berbagai tingkat modulasi, termasuk QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM. Analisis menyeluruh diperoleh untuk membandingkan kinerja masing-masing tingkat modulasi dalam hal *throughput* dalam teknologi 4G LTE. Data yang dikumpulkan digunakan untuk mengevaluasi dampak dari setiap tingkat modulasi terhadap kemampuan jaringan untuk mentransfer data. Analisis ini juga bertujuan untuk menemukan dan memahami perbedaan dan efek dari setiap tingkat modulasi terhadap kecepatan dan kualitas transmisi data dalam jaringan 4G LTE.

2.6 Pengumpulan Data dan Analisis

Pada langkah ini, data dari literatur yang dipilih akan dikumpulkan dan dianalisis. Untuk membandingkan *paper-paper* yang dipilih sebagai bahan penelitian lebih lanjut.

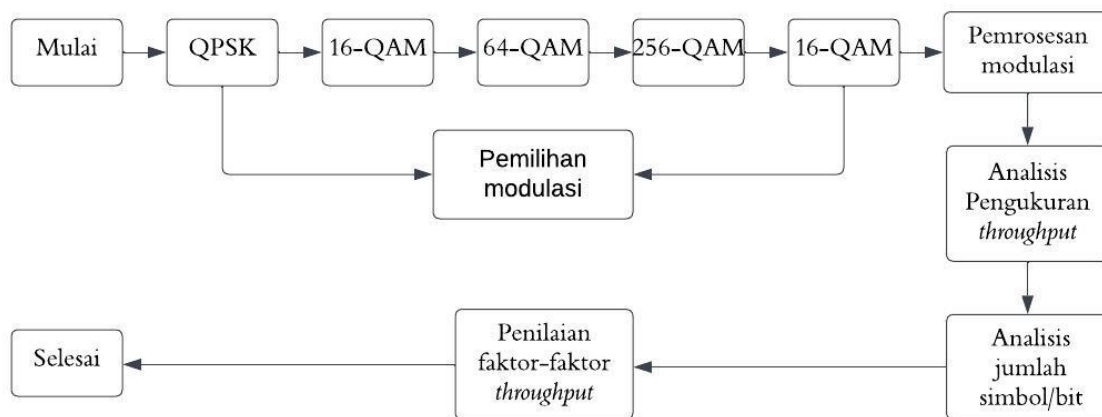
2.7 Kesimpulan

Setelah analisis selesai, hasilnya digunakan untuk membuat kesimpulan. Kesimpulan ini membantu menyajikan hasil dan implikasi penelitian tentang nilai *throughput* teknologi 4G LTE.

2.8 Selesai

Kemudian hasil identifikasi tersebut dikumpulkan dan dibuat kesimpulan yang didasarkan pada analisis mendalam atas temuan-temuan tersebut, memberikan pemahaman yang lebih terperinci mengenai tingkat modulasi serta evaluasi nilai *throughput* yang telah terbentuk dari pemahaman literatur yang dipelajari.

Selain menggunakan *flowchart* yang ditunjukkan pada Gambar 1, untuk mengilustrasikan langkah-langkah dalam penelitian ini. Peneliti menggunakan blok diagram yang ditunjukkan pada Gambar 2 mengenai aliran kerja sistem. Dalam konteks ini, langkah-langkah spesifik dari proses yang ingin dijelaskan dapat diuraikan secara terperinci dalam bentuk diagram blok. Sebagai contoh, dalam sebuah penelitian yang mempertimbangkan berbagai jenis modulasi (seperti QPSK, 16-QAM, 64-QAM, atau 256-QAM).



Gambar 2. Blok diagram penelitian

Langkah-langkah yang tergambar pada Gambar 2 dimulai dengan memilih jenis modulasi yang akan dianalisis, yakni: QPSK, 16-QAM, 64-QAM, atau 256-QAM. Setiap langkah spesifik untuk setiap jenis modulasi melibatkan proses modulasi pada data yang telah dipilih sebagai bagian dari tahap penelitian sebelumnya. Data modulasi yang telah ada diproses dan diatur untuk melakukan evaluasi terhadap *throughput*. Meskipun tidak melakukan pengukuran *throughput*, namun evaluasi melibatkan analisis jumlah simbol atau bit yang berhasil ditransmisikan dan diterima dalam jangka waktu tertentu untuk setiap skema modulasi. Kemudian, dilakukan perbandingan hasil *throughput* antara skema modulasi yang berbeda. Terakhir, variabel yang memengaruhi *throughput*, termasuk kebisingan dan kondisi area tertentu, diperhitungkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, hasil penelitian yang terdiri dari empat studi akan dideskripsikan terlebih dahulu, diikuti oleh pembahasan yang mendalam mengenai temuan-temuan tersebut.

3.1 Hasil Penelitian

Modulasi QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) adalah metode modulasi digital yang merupakan pengembangan dari modulasi PSK [10]. Modulasi digital ini membawa data dengan mengubah fase sinyal pembawa (*carrier*) [10]. Modulasi QPSK mengubah fase sinyal pembawa sinusoidal dengan amplitudo dan frekuensi tetap atau konstan. Karena masukan digital modulator QPSK adalah sinyal biner, diperlukan lebih dari satu bit masukan untuk menghasilkan empat kondisi masukan yang berbeda. Empat kondisi yang mungkin dengan dua bit adalah 00, 01, 10 dan 11 [11]. Kelebihan dan kekurangan modulasi QPSK yaitu lebih tahan terhadap interferensi dan laju bit rendah [12]. Sementara itu, modulasi 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM adalah jenis modulasi QAM. Modulasi QAM adalah skema modulasi yang membawa data dengan mengubah amplitudo dan fase sinyal *carrier*. QAM juga merupakan suatu metode untuk mentransmisikan data pada laju bit-bit yang lebih tinggi pada saluran atau kanal yang memiliki lebar pita yang terbatas [13]. QAM menggabungkan ASK dan PSK, sehingga konstelasi sinyalnya berubah sesuai amplitudo (jarak dari titik awal ke titik konstelasi) dan fase [13]. Nilai *throughput* rata-rata digunakan untuk parameter *throughput*. Nilai ini akan berbeda tergantung pada penggunaan modulasi. Tingkat modulasi yang lebih tinggi menghasilkan *throughput* yang lebih besar.

Peneliti menggunakan data yang telah dipublikasikan sebelumnya tentang kinerja jaringan di wilayah pasar Glodok, kota Jakarta untuk mengevaluasi tingkat *throughput*, dan membandingkan penelitian lain dalam lingkup yang berbeda, yaitu penelitian modulasi yang dilakukan di jalan raya, Kota Padang. Serta diperkuat dengan dua penelitian lainnya agar data yang dihasilkan lebih komprehensif. Peneliti berupaya menganalisis dan menafsirkan ulang data tersebut untuk mendapatkan pemahaman yang relevan mengenai penelitian ini.

3.1.1 Studi 1: Modulasi QPSK, 16-QAM, dan 64-QAM di Kota Padang

Studi pertama yang berjudul “*Effect of Modulation on Throughput of 4G LTE Network Frequency 1800 MHz*” [8], dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh modulasi pada nilai *throughput* di frekuensi 1800 MHz di Kota Padang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa modulasi 64-QAM memiliki nilai *throughput* paling besar dibandingkan dengan 16-QAM dan QPSK. Nilai *throughput* masing-masing adalah 65.275,1 kbps untuk 64-QAM, 27.293,9 kbps untuk 16-QAM, dan 5.247,4 kbps untuk QPSK. Berdasarkan data tersebut modulasi yang paling mempengaruhi nilai *throughput* adalah modulasi 64-QAM, dibandingkan dengan modulasi lain seperti QPSK dan 16-QAM. Modulasi 64-QAM terdiri dari 64 simbol yang masing-masing terdiri dari 6 bit, memiliki kemampuan untuk meningkatkan *throughput*, karena dapat mengirimkan lebih banyak data dalam satu simbol daripada modulasi lainnya. Hal tersebut ditunjukkan oleh hasil pengukuran lapangan atau *drive test* yang mana pengujian difokuskan di sepanjang jalan raya Kota Padang. Pengujian ini menunjukkan bagaimana modulasi, terutama modulasi 64-QAM pada frekuensi 1800 MHz dapat menjadi pilihan yang efektif untuk meningkatkan kecepatan dan kualitas layanan dan mempengaruhi performa jaringan di lingkungan dengan banyak lalu lintas, berbagai pengguna, dan infrastruktur.

3.1.2 Studi 2: Modulasi QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM di Pasar Glodok

Studi dua yang berjudul “*Analisis Unjuk Kerja Jaringan Microcell LTE Berdasarkan Variasi Level Modulasi*” [5] memperluas cakupan dengan mempertimbangkan QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM, yang dilakukan di Pasar Glodok dengan frekuensi 1800 MHz, membuat pemahaman tentang efek modulasi pada *throughput* menjadi lebih kompleks. Penelitian ini menguji efek modulasi terhadap parameter seperti *throughput* di lingkungan yang padat. Penelitian ini memberikan informasi mengenai dampak modulasi yang beragam terhadap kapasitas jaringan, membuka pemahaman yang lebih mendalam mengenai bagaimana QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM mempengaruhi efisiensi transfer data dalam situasi lalu lintas yang padat. Menurut data penelitian tersebut, data *throughput* dari setiap level modulasi adalah sebagai berikut. QPSK memiliki *throughput* rata-rata sebesar 14,01 Mbps, kemudian 16-QAM sebesar 21,5 Mbps, lalu 64-QAM sebesar 28,6 Mbps, dan *throughput* tertinggi adalah modulasi 256-QAM sebesar 33,87 Mbps. Hal tersebut dikarenakan modulasi 256-QAM membawa 8 bit per simbol, lebih besar dibandingkan modulasi lainnya, meskipun modulasi 256-QAM memiliki potensi *throughput* tertinggi, keberhasilan implementasinya dipengaruhi oleh kondisi saluran yang berbeda-beda. Pada lingkungan padat dengan interferensi tinggi, modulasi tingkat rendah seperti QPSK mungkin lebih efektif untuk menjaga koneksi yang stabil.

3.1.3 Studi 3: Analisis Implementasi *Open RAN* pada Jaringan 2G dan 4G di Frekuensi 900 MHz

Penelitian ini secara umum membahas implementasi sistem *open RAN* pada jaringan 2G dan 4G, namun peneliti mengutip bagian yang relevan dengan judul penelitian yang terfokus pada analisis khusus yang berkaitan dengan *throughput* dan dampak modulasi digital dalam konteks jaringan 4G. Adapun mengutip dan menyoroti hasil perhitungan bandwidth *throughput* e-Node B pada empat jenis modulasi yang berbeda, yang dilakukan menggunakan frekuensi 900 MHz dan lebar pita kanal sebesar 5 MHz. Hasil penelitian tersebut, menunjukkan bahwa, pemilihan jenis modulasi sangat berpengaruh terhadap kapasitas bandwidth untuk *throughput* pengguna. Semakin tinggi jenis modulasi yang digunakan, semakin besar *throughput* yang dihasilkan, sebagaimana terlihat pada nilai *throughput* yang meningkat secara proporsional dengan jenis modulasi yang lebih tinggi, mulai dari 8,4 Mbps untuk QPSK hingga 33,6 Mbps untuk 256 QAM pada frekuensi 900 MHz dengan kanal bandwidth 5 MHz. Ini menunjukkan bahwa dalam modulasi digital, semakin kompleks jenis modulasi yang digunakan, semakin tinggi juga *throughput* yang dapat diperoleh. Hal ini terkait dengan kemampuan modulasi yang lebih kompleks untuk membawa lebih banyak informasi dalam satu waktu, sehingga dapat menghasilkan *throughput* yang lebih tinggi. Namun, modulasi yang lebih kompleks juga dapat menjadi lebih rentan terhadap gangguan dan *noise* di lingkungan transmisi yang mungkin mempengaruhi kualitas sinyal.

3.1.4 Studi 4: Analisis Kinerja Terhadap *Throughput* dalam Jaringan 4G pada Lingkungan Digital

Studi 4 yang berjudul “*Performance Analysis on Throughput in 4G Network in Digital Environment with SISO Technique*”. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh modulasi digital terhadap *throughput* dalam jaringan 4G menggunakan teknik SISO pada kondisi fading yang berbeda antara lingkungan RF dan digital. Penelitian ini menyoroti perhitungan *throughput* pada penggunaan modulasi digital yang meliputi: QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Adapun perhitungan yang diperoleh pada modulasi QPSK sebesar 5,54 Mbps, sedangkan untuk modulasi 16-QAM sebesar 12,960 Mbps, dan nilai tertinggi *throughput* adalah 64-QAM sebesar 36,696 Mbps. Penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat modulasi yang digunakan, *throughput* yang dihasilkan juga lebih tinggi. Modulasi QPSK dapat bertahan di lingkungan dengan tingkat

kebisingan yang tinggi. Oleh karena itu, meskipun rasio sinyal-kebisingan terus meningkat, *throughput* akan terus bertambah namun akan terbatas pada batasannya. Di sisi lain, walaupun teknik modulasi 64-QAM memiliki nilai *throughput* yang lebih tinggi, tapi tidak memiliki daya tahan yang kuat. Ia tidak mampu bertahan dalam kondisi kebisingan yang lebih tinggi. Hal tersebut dikarenakan teknik modulasi QPSK memiliki keunggulan dalam menghadapi kebisingan tinggi karena mampu mengkodekan dua bit dalam satu simbol, sehingga memungkinkan pengirimannya lebih efisien. Ini berarti QPSK dapat mempertahankan kualitas transmisinya dalam lingkungan dengan tingkat kebisingan yang cukup tinggi. Sementara itu teknik modulasi 64-QAM memiliki kemampuan untuk mengkodekan lebih banyak informasi dalam satu simbol, namun rentan terhadap kebisingan karena setiap perubahan dalam sinyal dapat menyebabkan lebih banyak kesalahan saat transmisi data. Hal ini mengakibatkan performa 64-QAM menurun ketika terkena kebisingan yang lebih tinggi. Temuan ini mendukung konsep bahwa pemilihan modulasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan *throughput* dalam jaringan 4G. Modulasi digital memungkinkan transmisi data dengan tingkat yang lebih tinggi melalui jaringan *wireless* dengan memanfaatkan lebih efisien ruang frekuensi yang tersedia.

3.2 Studi Komparatif

Hasil dari keempat studi ini yang dituliskan dalam Tabel 1 secara konsisten menunjukkan bahwa modulasi dengan tingkat yang lebih tinggi dapat mentransmisikan lebih banyak informasi per simbol, menghasilkan *throughput* yang lebih besar dalam kondisi ideal. Salah satu perbedaan utama dalam tingkat *throughput* antara modulasi seperti QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM adalah jumlah bit yang dapat diwakili oleh setiap simbol. QPSK memiliki 2 bit per simbol, yang memungkinkan representasi 4 fase yang mungkin, sementara 16-QAM memiliki 4 bit per simbol, yang memungkinkan 16 kombinasi titik pada konstelasi, yang menggabungkan amplitudo dan fase. 64-QAM memiliki 6 bit per simbol, yang memungkinkan representasi 64 titik pada diagram. Sementara modulasi 256-QAM dapat mengirimkan informasi 8 bit per simbol. Modulasi 64-QAM ataupun 256-QAM dapat mengirim lebih banyak data dalam satu simbol dengan jumlah bit yang lebih besar. Ini memungkinkan transmisi lebih banyak data dalam interval waktu yang sama, yang meningkatkan *throughput* jaringan secara keseluruhan. Hal tersebut yang mendasari modulasi 64-QAM yang memiliki angka *throughput* yang lebih tinggi dibandingkan dengan modulasi QPSK dan 16-QAM.

Tabel 1. Studi komparatif penelitian

Judul penelitian	Tujuan penelitian	Hasil penelitian
<i>Effect of Modulation on Throughput of 4G LTE Network Frequency 1800 MHz.</i>	Penelitian ini bertujuan untuk mengamati pengaruh skema modulasi terhadap nilai <i>throughput</i> dalam konteks teknologi 4G LTE.	Hasil <i>drive test</i> menunjukkan: modulasi QPSK memiliki nilai <i>throughput</i> sebesar 5.247,4 kbps, 16-QAM memiliki nilai <i>throughput</i> sebesar 27.293,9 kbps, dan 64-QAM memiliki nilai <i>throughput</i> sebesar 65.275,1 kbps. Berdasarkan data dan perhitungan, modulasi yang paling tinggi berdampak pada <i>throughput</i> adalah 64-QAM
Analisis Unjuk Kerja Jaringan <i>Microcell</i> LTE Berdasarkan Variasi Level Modulasi.	Dalam lingkup pengukuran <i>throughput</i> , tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan dan mengevaluasi <i>throughput</i> dari berbagai level modulasi (QPSK, 16-QAM, 64-QAM, dan 256-QAM) dan memahami bagaimana level modulasi yang berbeda mempengaruhi nilai <i>throughput</i> .	Dalam parameter <i>throughput</i> , modulasi 256-QAM memiliki nilai <i>throughput</i> tertinggi sebesar 33,87 Mbps, sementara QPSK memiliki nilai <i>throughput</i> terendah sebesar 14,01 Mbps, kemudian 16-QAM sebesar 21,5 Mbps, lalu 64-QAM sebesar 28,6 Mbps.
Analisis Implementasi <i>Open RAN</i> Pada Jaringan 2G dan 4G di Frekuensi 900 MHz.	Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis implementasi <i>Open RAN</i> pada Jaringan 2G dan 4G pada Frekuensi 900 MHz. Penelitian ini berfokus pada pengambilan data <i>throughput</i> 4G yang kemudian dievaluasi untuk membandingkan perbedaan <i>throughput</i> yang terjadi berdasarkan jenis modulasi yang digunakan.	Hasil perhitungan bandwidth <i>throughput</i> membuktikan bahwa modulasi 256-QAM memberikan <i>throughput</i> yang lebih tinggi (33,6 Mbps) dibandingkan dengan modulasi QPSK (8,4 Mbps), 16-QAM (16,8 Mbps), 64-QAM (25,2 Mbps).

Performance Analysis on Throughput in 4G Network in Digital Environment with SISO Technique.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perbandingan kinerja *throughput* yang dihasilkan oleh berbagai teknik modulasi yang direkomendasikan untuk implementasi dalam jaringan 4G.

Hasil perhitungan *bandwidth throughput* membuktikan bahwa modulasi 256-QAM memberikan *throughput* yang lebih tinggi (33,6 Mbps) dibandingkan dengan modulasi QPSK (8,4 Mbps), 16-QAM (16,8 Mbps), 64-QAM (25,2 Mbps).

Keempat penelitian menyoroti bahwa faktor-faktor lingkungan yang bervariasi mempengaruhi pilihan modulasi yang tepat guna menjaga koneksi yang ideal. Salah satu contohnya adalah penyesuaian skema modulasi dengan keadaan jaringan. Sebagai contoh, QPSK, karena ketahanannya terhadap gangguan, lebih cocok digunakan pada kondisi kanal yang buruk. Di sisi lain, modulasi 64-QAM maupun 256-QAM mampu memberikan *throughput* tertinggi pada kondisi SINR yang baik, meskipun lebih rentan terhadap gangguan dan kesalahan estimasi kanal. Namun, perlu dicatat bahwa modulasi yang lebih tinggi dapat meningkatkan *throughput*, namun dapat membuat sinyal lebih rentan terhadap gangguan dan degradasi saat melalui saluran yang tidak ideal atau mengalami gangguan. Oleh karena itu, kondisi saluran yang baik sangat penting untuk mempertahankan kualitas transmisi yang optimal saat menggunakan modulasi tinggi. Dalam kondisi saluran yang baik, penggunaan modulasi tinggi seperti 256-QAM dapat meningkatkan jumlah data yang dapat ditransmisikan dalam satu waktu karena kapasitas untuk membawa lebih banyak informasi dalam setiap simbol. Namun, ketika kondisi saluran tidak ideal, seperti terdapat gangguan atau kebisingan, performa modulasi tinggi mungkin tidak sesuai dengan harapan yang diinginkan.

4. KESIMPULAN

Sangat penting untuk mempertimbangkan penyesuaian modulasi untuk kondisi lingkungan yang sesuai. Modulasi tinggi seperti 256-QAM dan 64-QAM dapat menghasilkan *throughput* tinggi pada kondisi SINR yang baik, tetapi modulasi QPSK cocok untuk kanal yang tidak baik atau buruk. Namun, modulasi tinggi rentan terhadap gangguan dan kesalahan kanal. Oleh karena itu, sangat penting untuk memastikan bahwa saluran selalu dalam kondisi baik untuk menjamin kualitas transmisi yang optimal. Setelah menganalisis beberapa macam modulasi digital (ASK, FSK, PSK, QAM) yang berdasar pada referensi *paper* yang sudah ditetapkan, peneliti menyimpulkan bahwa setiap modulasi digital mempunyai kelebihan dan kekurangan yang dimana dari keempat modulasi digital pada jaringan 4G LTE, peneliti mengambil modulasi QAM sebagai bahan studi komparatif, karena modulasi tersebut yang paling modern dibandingkan dengan modulasi lainnya. Serta modulasi simpleks yang diambil peneliti, sesuai dengan judul penelitian yaitu modulasi QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), karena berhubungan dengan jaringan nirkabel dan tahan terhadap gangguan amplitudo. Dalam evaluasi *throughput*, aspek-aspek seperti *bandwidth*, jumlah pengguna, metode komunikasi, dan kondisi jaringan harus diperhatikan. Evaluasi beberapa *paper* menunjukkan bahwa *throughput* terbaik diperoleh dari penelitian satu yaitu modulasi 64-QAM sebesar 65.275,1 kbps, penelitian dua yaitu modulasi 256-QAM sebesar 33,87, penelitian tiga yaitu modulasi 256-QAM sebesar 33,6 Mbps, dan penelitian empat sebesar 36,696 Mbps. Semua faktor tersebut berpengaruh pada efektivitas komunikasi data. QPSK memiliki kelebihan dalam efisiensi spektral dengan mentransmisikan dua bit per simbolnya, meningkatkan kecepatan pengiriman data dalam *bandwidth* yang sama dengan modulasi dasar lainnya, namun memiliki sensitivitas terhadap kesalahan sinkronisasi fase yang memengaruhi kinerja transmisi. Sementara itu, QAM dapat mengkodekan lebih banyak level atau simbol, meningkatkan kapasitas transmisi data, namun kompleksitasnya dan sensitivitas terhadap *noise* dan interferensi menjadi tantangan dalam implementasi sesuai dengan kebutuhan aplikasi dan kondisi lingkungan yang spesifik.

REFERENSI

- [1] F. A. Rahmat, D. Chandra, "Analisis Kinerja Kualitas Jaringan 4G Long Term Evolution Di Kawasan Perumahan Singgalang, Koto Tangah, Kota Padang," *TELEKONTRAN*, vol. 10, no. 2, 2022. <https://doi.org/10.34010/TELEKONTRAN.V10I2.7904>
- [2] A. Solano-Escorcía, J. Sanjuanelo-Barraza, B. Cujavante-Hernandez, A. Cama-Pinto, D. Cama-Pinto, "A review on digital modulation in 4G LTE/4G LTE Advanced," *EasyChair Preprint*, No. 7612, Mar. 2022.
- [3] J. Chen, C. Yang, Y. Mai, "A novel smart forwarding scheme in LTE-Advanced networks," *China Communications*, vol. 12, no. 3, hal. 120–131, Mar. 2015. <http://doi.org/10.1109/CC.2015.7084370>
- [4] F. Maulana, P. W. Purnawan, "Simulasi dan Kajian Perbandingan Metode Optimasi Jaringan LTE (Long Term Evolution) dengan Pemasangan Repeater, Perencanaan in Building Coverage dan Upgrade Carrier Module di Apartemen Saint Moritz," *MAESTRO*, vol. 2, no. 1, hal. 185-197, 2019.
- [5] S. F. Arumsidi, A. F. Isnawati, A. Wahyudin, "Analisis Unjuk kerja Jaringan Microcell LTE Berdasarkan Variasi Level Modulasi," *AITI*, vol. 16, no. 2, hal. 99-114, Jun. 2020. <https://doi.org/10.24246/aiti.v16i2.99-114>

- [6] H. K. Channi, "A Comparative Study of Various Digital Modulation Techniques," *International Journal in IT and Engineering*, vol. 4, no. 3, hal. 39–49, 2016.
- [7] Y. Esye, R. Anas, "Rancang Bangun Perangkat Modulator QPSK," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 6, no. 1, hal. 9-22, 2016.
- [8] D. Chandra, F. A. Rahmat, S. Aulia, A. F. Kasmar, "Effect of Modulation on Throughput of 4G LTE Network Frequency 1800 MHz," *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, vol. 5, no. 1, hal. 44-53, 2023.
- [9] N. J. Ahmed, Md. R. Islam, V. Dutta, I. K. Gupta, "Performance Analysis on Throughput in 4G Network in Digital Environment with SISO Technique," *International Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, vol. 5, no. 7, hal. 71–79, 2013. <http://doi.org/10.5815/ijitcs.2013.07.09>
- [10] D. K. Mayzar, D. Dwiyantri, F. E. Ananda, "Rancang Bangun Simulasi Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Berbasis Graphical User Interface (GUI)," *Spektral*, vol. 1, no. 1, hal. 24-29, 2020. <http://doi.org/10.32722/spektral.v1i1.3433>
- [11] S. Ariyanti, B. A. Purwanto, "Analisis kinerja penggunaan modulasi QPSK, 8PSK, 16QAM pada satelit Telkom-1," *Buletin Pos dan Telekomunikasi*, vol. 11, no. 1, hal. 45, 2015. <http://doi.org/10.17933/bpostel.2013.110104>
- [12] F. Amillia, R. P. E. Putra, "Analisis Unjuk Kerja Decision Feedback Equalizer Pada Sistem SCFDMA," *Seminar Nasional Teknologi Informasi, Komunikasi dan Industri (SNTIKI) 9*, hal. 376-382, Riau, 2017.
- [13] F. Dheaputro, Y. S. Rohmah, and A. D. Pambudi, "Perancangan Simulator Modulasi dan Demodulasi 16-QAM DAN 64-QAM Menggunakan LabVIEW," *e-Proceeding of Applied Science*, vol. 1, no. 2, hal. 1450-1456, 2015.