

SIMULASI SKEMA MODULASI 1024-QAM DAN 4096-QAM PADA SISTEM KOMUNIKASI DIGITAL

Danang Maulana Ikhsan ^{1*}, Theophilus Wellem ²

^{1*, 2} Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Kristen Satya Wacana, Kota Salatiga, Provinsi Jawa Tengah, Indonesia.

Email: 672019098@student.uksw.edu ^{1*}, theophilus.wellem@uksw.edu ²

Histori Artikel:

Dikirim 13 Juni 2023; *Diterima dalam bentuk revisi* 15 Juli 2023; *Diterima* 8 Agustus 2023; *Diterbitkan* 10 September 2023. Semua hak dilindungi oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) STMIK Indonesia Banda Aceh.

Abstrak

Quadrature amplitude modulation (QAM) merupakan salah satu skema modulasi yang umum digunakan oleh sistem komunikasi digital untuk memperoleh data rate yang tinggi pada bandwidth yang terbatas. Skema M-ary QAM dengan nilai M lebih besar dari 256 saat ini telah digunakan beberapa standar jaringan wireless, misalnya WiFi 6 dan WiFi 7 (standar akan dirilis pada tahun 2024) yang masing-masing menggunakan skema modulasi 1024-QAM dan 4096-QAM. Dengan terus berkembangnya teknologi untuk sistem komunikasi digital, baik wireline maupun wireless, maka penelitian mengenai skema modulasi tingkat lanjut menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini membahas simulasi skema modulasi 1024-QAM dan 4096-QAM menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan tujuan untuk membandingkan kinerja kedua skema modulasi tersebut pada transmisi data tanpa menggunakan error control code melalui kanal AWGN. Hasil simulasi menunjukkan bahwa 4096-QAM lebih unggul dari 1024-QAM tetapi membutuhkan nilai E_b/N_0 dan SNR yang lebih tinggi. Nilai E_b/N_0 yang dibutuhkan oleh 4096-QAM untuk mencapai bit error ratio (BER) 10^{-4} adalah 31 dB, sedangkan pada 1024-QAM dibutuhkan nilai E_b/N_0 sebesar 26 dB.

Kata Kunci: Komunikasi Digital; Modulasi; Amplitudo; 1024-QAM; 4096-QAM.

Abstract

Quadrature amplitude modulation (QAM) is a modulation scheme used by digital communication systems to obtain high data rates in bandwidth-limited channels. M-ary QAM schemes with M values greater than 256 are currently used by wireless network standards, such as WiFi 6 and WiFi 7 (final standard will be released in 2024), which use the 1024-QAM and 4096-QAM modulation schemes, respectively. With the continuous development of technology for digital communication systems, both wireline and wireless, it is essential to research regarding advanced modulation schemes. This study discusses the simulation of the 1024-QAM and 4096-QAM modulation schemes using MATLAB software to compare the performance of the two modulation schemes in data transmission through the AWGN channel without using an error control code. The simulation results show that 4096-QAM is superior to 1024-QAM but requires higher E_b/N_0 and SNR values. The E_b/N_0 value required by the 4096-QAM to achieve a bit error ratio (BER) of 10^{-4} is 31 dB, while the 1024-QAM requires an E_b/N_0 value of 26 dB.

Keyword: Digital Communication; Modulation; Amplitude; 1024-QAM; 4096-QAM.

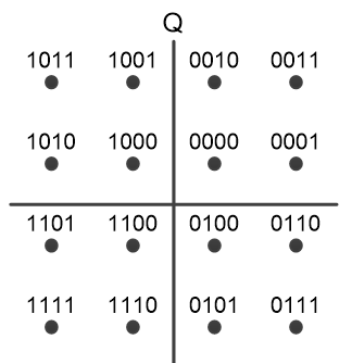
1. Pendahuluan

Teknik atau skema modulasi merupakan bagian yang penting pada sistem komunikasi digital untuk mencapai *data rate* yang tinggi dengan penggunaan daya transmisi (*transmission power*) dan *bandwidth* yang efisien [1]. Standar teknologi komunikasi nirkabel seperti 4G LTE [2], 5G [3], dan IEEE 802.11 *wireless* LAN generasi ke-6 (WiFi 6) [4] menggunakan berbagai skema modulasi pada *physical layer*-nya untuk memperoleh *data rate* yang telah ditentukan oleh masing-masing standar tersebut. Skema modulasi yang digunakan untuk mentransmisikan data pada suatu sistem komunikasi ditentukan oleh beberapa faktor, misalnya, *bandwidth*, *data rate*, dan daya transmisi [5]. Skema modulasi digital dapat diklasifikasikan berdasarkan tiga parameter dari sinyal pembawa (*carrier signal*) yang dimodulasi untuk merepresentasikan data yaitu, amplitudo (*amplitude*), frekuensi (*frequency*), dan fase (*phase*). Tiga skema ini, dikenal dengan nama *Amplitude Shift Keying* (ASK), *Frequency Shift Keying* (FSK), dan *Phase Shift Keying* (PSK), memungkinkan data digital direpresentasikan menggunakan sinyal analog (*bandpass modulation*) sehingga dapat ditransmisikan secara *wireless* [6]. Secara singkat, pada masing-masing modulasi ASK, FSK, dan PSK, amplitudo, frekuensi, dan fase dari sinyal yang ditransmisikan divariasikan atau diubah untuk merepresentasikan bit-bit pada data digital. Sebagai contoh, misalnya pada modulasi (*binary*) ASK, untuk bit '0', amplitudo sinyal bernilai 0 volt, sedangkan untuk bit '1', amplitudo sinyal bernilai 5 volt.

Berdasarkan tiga skema modulasi dasar di atas dikembangkan skema-skema modulasi yang lebih kompleks, misalnya *Quadrature PSK* (QPSK atau 4-PSK), 8-PSK, dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Modulasi QAM dapat dilihat sebagai kombinasi antara ASK dan PSK di mana amplitudo dan fase pada sinyal yang ditransmisikan diubah secara bersamaan untuk merepresentasikan bit-bit pada data digital. Dari berbagai skema modulasi, *M*-ary QAM (dengan *M* adalah jumlah simbol atau *constellation point*) merupakan modulasi yang paling banyak digunakan pada berbagai standar komunikasi digital, misalnya 16-QAM (digunakan pada Digital Video Broadcasting atau transmisi TV digital), 64-QAM, 1024-QAM (digunakan pada WiFi 6), dan 4096-QAM (digunakan pada WiFi 7). Hal ini karena QAM dapat menyediakan *data rate* yang tinggi dengan daya transmisi dan *bandwidth* yang efisien [7]. Tabel 1 menunjukkan perbandingan dari beberapa skema QAM yang sering digunakan dan Gambar 1 menunjukkan contoh *constellation diagram* dari 16-QAM. Setiap simbol atau *constellation point* pada QAM merepresentasikan pola bit pada data digital menggunakan amplitudo dan fase tertentu dari sinyal pembawa.

Tabel 1. Beberapa skema modulasi QAM

	16-QAM	64-QAM	1024-QAM	4096-QAM
Jumlah bit per simbol	4	6	10	12
Jumlah simbol pada <i>constellation diagram</i>	16	64	1024	4096



Gambar 1. 16-QAM *constellation diagram*

Oleh karena semakin banyaknya penggunaan QAM terutama pada standar-standar terbaru komunikasi *wireless*, maka penelitian mengenai skema modulasi QAM menjadi penting untuk dilakukan dalam rangka mempelajari kinerja (*performance*) dari skema modulasi tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi menggunakan simulasi mengenai skema modulasi 1024-QAM dan 4096-QAM. Simulasi dilakukan untuk mempelajari proses pengiriman dan penerimaan data digital yang ditransmisikan menggunakan 1024-QAM dan 4096-QAM, dan diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai kinerja dari kedua skema modulasi ini. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB.

Beberapa penelitian terdahulu mengenai modulasi QAM menjadi acuan pada penelitian ini [8]–[11]. Penelitian oleh Pratiwi dan Setyowati [8] membahas perbandingan antara 16-QAM dan 64-QAM untuk sistem komunikasi *wireless*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa 16-QAM mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan 64-QAM karena membutuhkan nilai *signal-to-noise ratio* (SNR) yang lebih rendah untuk mencapai *bit error ratio* (BER) sebesar 10^{-3} . Perbandingan tersebut dilakukan tanpa menggunakan suatu *error correction code*. Penelitian oleh Weller, dkk. [9] membahas kinerja fitur 1024-QAM dan *downlink* (DL) OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) pada WiFi 6 dan pengaruhnya terhadap *latency* dan *throughput* yang dapat dicapai. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan 1024-QAM dapat meningkatkan *throughput*. Selain itu, penggunaan OFDMA pada transmisi *downlink* (transmisi dari *access point* ke *client*) tidak begitu berpengaruh pada *latency* jika jumlah *client* yang digunakan terlalu sedikit. Kinerja DL OFDMA sangat tergantung pada kemampuan *access point* dalam menjadwalkan transmisi data untuk beberapa *client*. Selanjutnya, penelitian oleh Otsuka, dkk. [10] membahas penggunaan 1024-QAM dan 4096-QAM pada OFDM dengan *soft decision* Viterbi *decoding* untuk komunikasi 5G.

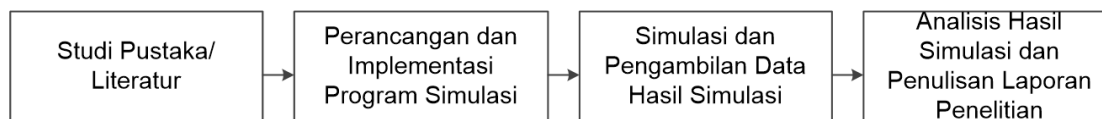
Penelitian tersebut menunjukkan bahwa modulasi QAM dengan jumlah simbol yang besar atau *high-order QAM* (dengan $M=1024$ dan $M=4096$) dapat digunakan pada sistem komunikasi 5G untuk mencapai *data rate* yang lebih tinggi dibandingkan dengan skema modulasi yang digunakan saat ini. Pada penelitian [11], Tian, dkk. membahas mengenai pemanfaatan 4096-QAM dibandingkan dengan skema modulasi QPSK dan QAM lainnya untuk komunikasi 5G. Selanjutnya, pada penelitian [12] oleh Lu, dkk. dikembangkan *dual-band transceiver* untuk IEEE 802.11ax WiFi 6. *Transceiver* ini mendukung skema modulasi 1024-QAM dan *channel bandwidth* (CBW) sebesar 160 MHz. Penelitian [13] oleh Kawai, dkk. mengembangkan 1024-QAM OFDM WiFi *receiver*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *receiver* tersebut dapat menerima sinyal yang dimodulasikan dengan 1024-QAM dengan *error* yang sangat rendah. Selain itu, *receiver* tersebut juga dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi *receiver* yang kompatibel untuk standar IEEE 802.11ax WiFi 6. Selanjutnya, penelitian oleh Tian, dkk. [14] membahas mengenai pengaruh dari *phase error* pada OFDM-based 4096-QAM dengan *turbo coding* karena modulasi QAM (*high-order*) sangat sensitif terhadap *amplitude* dan *phase error*. Penelitian [15] dan [16] membahas mengenai metrik *log-likelihood ratio* untuk *soft decoding* menggunakan Viterbi *decoding*. Metrik tersebut divalidasi dengan melakukan simulasi IEEE 802.11ax WiFi 6 PHY *layer* (1024-QAM) dan IEEE 802.11be WiFi 7 PHY *layer* (4096-QAM). Penelitian oleh Abid, dkk. [17] melakukan simulasi untuk membandingkan WiFi 5 dan WiFi 6 *transceiver*. Modulasi yang digunakan untuk WiFi 5 adalah M -PSK dan M -QAM dengan nilai M yang disimulasikan adalah 16, 64, dan 256. Untuk simulasi WiFi 6 nilai M yang digunakan adalah 16, 64, 256, dan 1024.

Berdasarkan kajian terhadap berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai modulasi QAM dengan jumlah simbol yang besar merupakan hal yang penting untuk dilakukan. Hal ini karena modulasi *high-order QAM* merupakan salah satu kandidat skema modulasi untuk sistem komunikasi di masa depan (misalnya, 6G [18] dan WiFi 7 yang akan dirilis pada tahun 2024 [19]). *High-order QAM* merupakan teknik modulasi yang memungkinkan transmisi dengan *data rate* yang tinggi pada *bandwidth* yang terbatas.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif dengan

eksperimen. Eksperimen dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB versi R2022a. Tahapan dalam melaksanakan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2 dan dapat dijelaskan sebagai berikut:

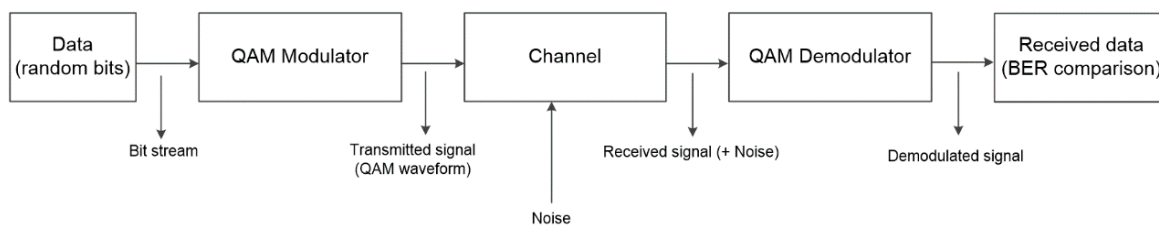


Gambar 2. Tahapan penelitian

- 1) Tahap studi pustaka/literatur.
Pada tahap ini dilakukan studi pustaka mengenai sistem komunikasi wireless, terutama yang berkaitan dengan modulasi QAM serta teknologi WiFi 6 dan WiFi 7 yang menggunakan modulasi 1024-QAM dan 4096-QAM. Studi pustaka ini bertujuan untuk mencari topik dan identifikasi masalah yang akan diteliti.
- 2) Tahap perancangan dan implementasi program untuk simulasi.
Pada tahap ini rancangan simulasi ditentukan misalnya, input data untuk simulasi dan fungsi-fungsi yang digunakan pada simulasi. Program untuk simulasi diimplementasikan melalui pemrograman MATLAB dilakukan pada tahap ini.
- 3) Tahap simulasi dan pengambilan data hasil simulasi.
Pada tahap ini dilakukan simulasi dan pengambilan data hasil simulasi modulasi 1024-QAM dan 4096-QAM untuk kemudian dianalisis.
- 4) Tahap analisis hasil simulasi dan penulisan laporan penelitian.
Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil yang diperoleh dari simulasi dan dibandingkan dengan teori yang ada. Selanjutnya, penulisan laporan penelitian dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian.

Diagram blok simulasi QAM yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada simulasi ini *input* data yang digunakan berupa *bit stream* yang berasal dari *random integer* dibangkitkan dengan fungsi *randi()*. *Input* data ini kemudian diberikan ke QAM *modulator* (1024-QAM/4096-QAM). *Output* dari QAM *modulator* adalah sinyal yang akan ditransmisikan melalui kanal (*channel*) *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Kanal AWGN merupakan model kanal pada sistem komunikasi di mana sinyal yang melewati kanal tersebut bercampur atau ditambahkan dengan *noise*. *Noise* ini mempunyai kerapatan spektral daya (*power spectral density*) yang sama untuk seluruh frekuensi pada kanal tersebut. Sinyal (ditambah *noise*) yang diterima pada sisi penerima (*receiver*) kemudian diproses oleh QAM *demodulator* dan didemodulasi untuk memperoleh kembali data yang ditransmisikan dari sisi pengirim (*transmitter*).

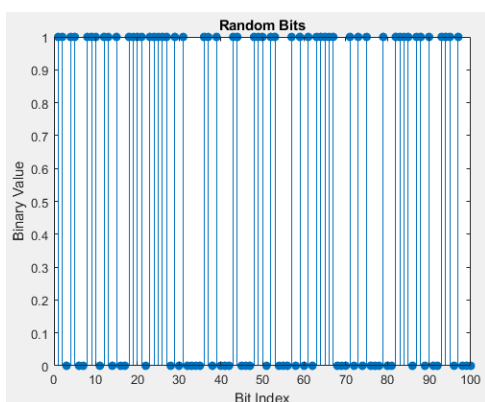
Bit error rate (BER) merupakan ukuran (metrik) yang umum digunakan untuk melakukan evaluasi terhadap unjuk kerja dari skema modulasi. BER dapat dilihat sebagai perbandingan jumlah *bit error* (bit yang mengalami *error* karena *noise*, interferensi, dan gangguan lainnya pada kanal) dengan jumlah total bit yang diterima. Nilai BER umumnya diplot pada grafik semilog dengan sumbu x merepresentasikan nilai E_b/N_0 dan sumbu y menunjukkan nilai BER. E_b/N_0 merupakan perbandingan energi per bit terhadap kerapatan spektral daya dari *noise* (*noise power spectral density*) di mana E_b merupakan energi sinyal per satu bit data dan N_0 merupakan *noise power* per satu hertz *bandwidth*. E_b/N_0 dapat diartikan sebagai nilai energi bit per *noise power spectral density* yang dibutuhkan untuk menghasilkan atau mencapai *bit error probability* yang ditetapkan untuk suatu standar komunikasi (misalnya, 10^{-10} , 10^{-12}). E_b/N_0 juga dikenal dengan *signal-to-noise ratio* (SNR) per bit.



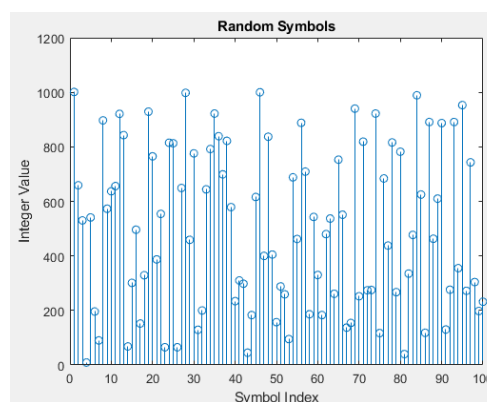
Gambar 3. Diagram blok simulasi 1024-QAM dan 4096-QAM

3. Hasil dan Pembahasan

Jumlah bit yang dibangkitkan secara acak untuk digunakan pada simulasi adalah $k \times 10^4$ bit dengan k adalah jumlah bit per simbol ($k=10$ untuk QAM-1024 dan $k=12$ untuk 4096-QAM). Gambar 3 menunjukkan 100 bit pertama dari data yang akan ditransmisikan ke penerima. Setelah *bit stream* dibangkitkan, langkah berikutnya adalah mengelompokkan bit-bit tersebut di mana setiap kelompok terdiri dari k -bit. Selanjutnya, setiap kelompok k -bit ini dikonversikan menjadi integer dan diberikan sebagai input untuk *QAM modulator*. Gambar 4 menunjukkan 100 simbol acak dimana setiap simbol merepresentasikan 10 bit data (untuk QAM-1024).

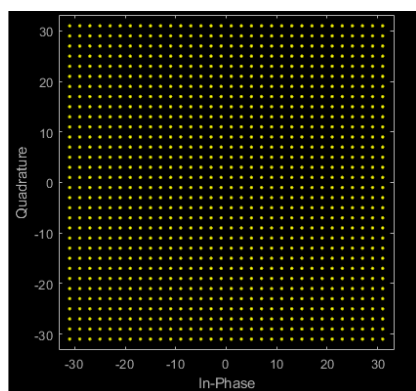


Gambar 4. Input *bit stream*.

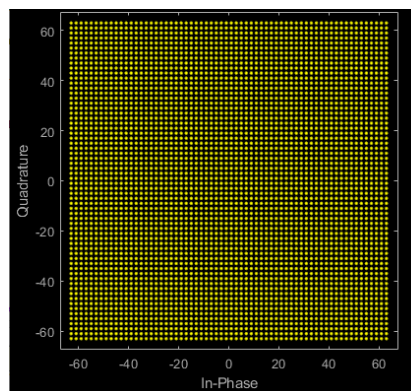


Gambar 5. Input simbol

Pada modulasi QAM-1024, setiap 10 bit data direpresentasikan dengan amplitudo dan fase tertentu dari sinyal yang dimodulasi. Setiap kombinasi 10 bit data ini (dari 0000000000 hingga 1111111111) diplot sebagai sebuah titik atau *constellation point* pada *constellation diagram* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 6 menunjukkan *constellation diagram* untuk 4096-QAM di mana setiap titik merupakan simbol dari setiap kombinasi 12 bit data (000000000000 hingga 111111111111).

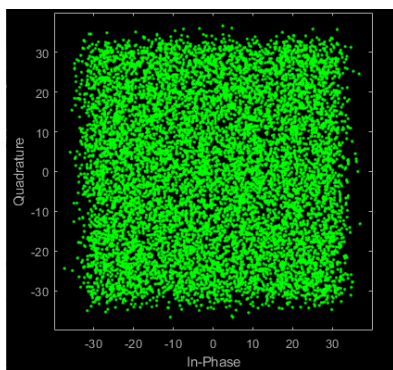
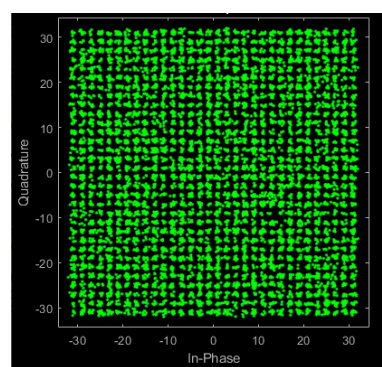


Gambar 6. *Constellation diagram* 1024-QAM.



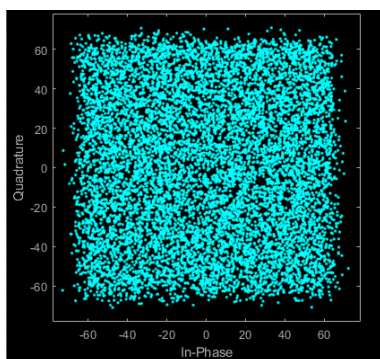
Gambar 7. 4096-QAM

Setelah proses modulasi, sinyal QAM yang dihasilkan dikirimkan melalui kanal AWGN. Pada simulasi yang dilakukan, nilai E_b/N_0 dibuat bervariasi mulai dari 1 dB hingga 35 dB. *Constellation diagram* dari sinyal yang diterima oleh *receiver* (*output* dari kanal) kemudian diobservasi untuk mengamati pengaruh dari variasi nilai E_b/N_0 . Sebagai contoh, Gambar 7 dan 8 menunjukkan *constellation diagram* pada E_b/N_0 bernilai 10 dB dan 25 dB untuk 1024-QAM. Pada Gambar 8 dapat dilihat bahwa pada nilai E_b/N_0 yang kecil, titik-titik pada *constellation diagram* terletak berdekatan (terdapat banyak *error* karena *noise* pada kanal) sehingga akan menyulitkan penerima untuk melakukan *sampling* dan mengambil kembali data yang ditransmisikan dari pengirim (bandingkan dengan Gambar 6). Jumlah *bit error* mencapai 13385 dari 10^5 bit yang diterima. Idealnya, suatu titik pada *constellation diagram* penerima harus berada pada posisi yang sama dengan posisi titik tersebut pada *constellation diagram* pengirim. Deviasi titik ini dari posisi idealnya secara umum diukur dengan metrik *error vector magnitude* (EVM). Gambar 8 menunjukkan hasil dengan nilai E_b/N_0 yang lebih besar (yang juga berarti nilai SNR lebih besar). Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa titik-titik pada *constellation diagram* lebih terpisah sehingga memudahkan penerima untuk menerjemahkan simbol-simbol tersebut kembali menjadi data semula. Pada nilai E_b/N_0 sebesar 25 dB hanya terdapat 50 *bit error* dari 10^5 bit yang diterima. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dari E_b/N_0 bernilai 1 dB hingga 35 dB, pada $E_b/N_0=27$ dB terdapat hanya 1 *bit error* dan pada E_b/N_0 bernilai 28 dB hingga 35 dB tidak terdapat *bit error*.

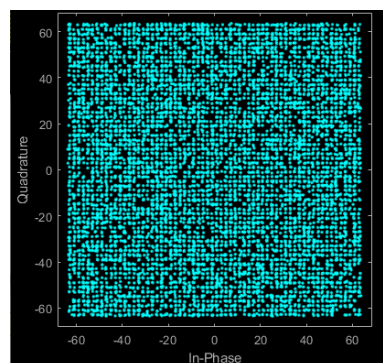
Gambar 8. 1024-QAM $E_b/N_0=10$ dBGambar 9. $E_b/N_0=25$ dB

Gambar 10 dan 11 menunjukkan *constellation diagram* pada E_b/N_0 bernilai 10 dB dan 32 dB untuk 4096-QAM. Seperti halnya pada 1024-QAM, untuk nilai E_b/N_0 yang kecil, sinyal yang diterima oleh *receiver* sangat dipengaruhi oleh *noise* (bandingkan dengan Gambar 7). Nilai E_b/N_0 yang disimulasikan sama seperti sebelumnya dari nilai 1 dB hingga 35 dB. Untuk nilai $E_b/N_0=10$ dB dan 32 dB, jumlah *bit error* masing-masing mencapai 22382 bit dan 5 bit. Perbandingan kinerja berbagai skema modulasi umumnya digambarkan menggunakan BER *plot* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12.

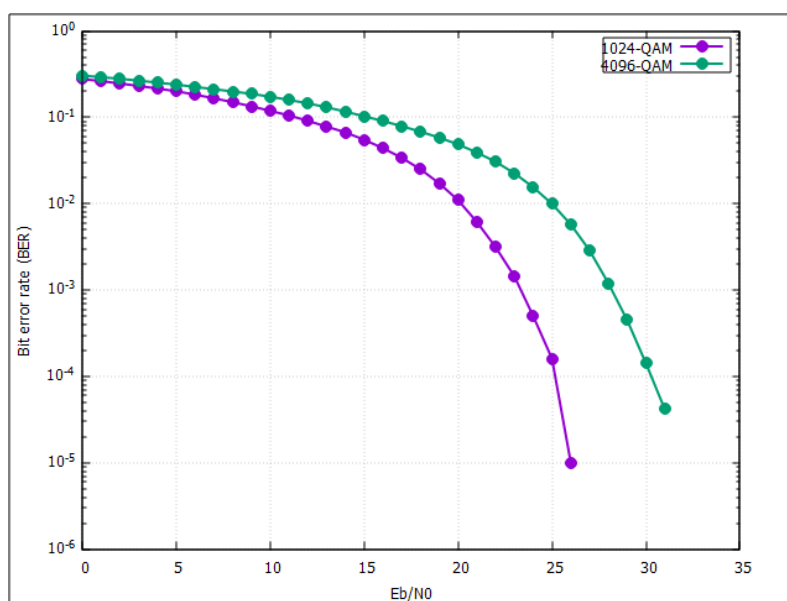
Berdasarkan *plot* tersebut dapat dilihat bahwa untuk mencapai BER 10^{-4} , 1024-QAM membutuhkan nilai E_b/N_0 (juga SNR) yang lebih rendah dibandingkan dengan 4096-QAM. Skema 4096-QAM membawa 12 bit tiap simbol atau lebih banyak bit dibandingkan dengan 1024-QAM sehingga lebih mudah terpengaruh oleh *noise* pada kanal. Oleh karena itu, skema 4096-QAM membutuhkan nilai E_b/N_0 yang lebih besar untuk memperoleh BER yang lebih rendah. Semakin besar nilai M dari suatu skema modulasi M -ary QAM, maka desain perangkat keras pada sisi penerima juga akan semakin kompleks karena sisi penerima harus dapat melakukan demodulasi sinyal menjadi simbol-simbol yang merepresentasikan data. Untuk mendapatkan transmisi yang handal atau *reliable* (mempunyai BER serendah mungkin), sistem komunikasi digital umumnya menggunakan *error control code* atau *error-correction code* (ECC), seperti Reed-Solomon (RS) *code*, *Low Density Parity Check* (LDPC) *code*, dan *Polar code*. Adanya ECC memungkinkan penerima untuk memperbaiki atau mengoreksi bit-bit yang mengalami *error* tanpa harus meminta pengiriman ulang data dari pengirim (*data retransmission*). Hal ini dapat menghemat penggunaan *bandwidth* dan daya transmisi.



Gambar 10. 4096-QAM $E_b/N_0=10$ dB.



Gambar 11. $E_b/N_0=32$ dB



Gambar 12. BER *plot* untuk 1024-QAM dan 4096-QAM

4. Kesimpulan

Penelitian ini melakukan simulasi skema modulasi 1024-QAM dan 4096-QAM untuk sistem komunikasi digital. Kedua skema modulasi merupakan teknik yang digunakan oleh beberapa standar baru dalam sistem komunikasi, misalnya IEEE 802.11ax WiFi 6 dan IEEE 802.11ax WiFi 7. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan diperoleh bahwa skema 4096-QAM yang dapat membawa data lebih banyak dari 1024-QAM membutuhkan nilai E_b/N_0 atau SNR yang lebih besar. Nilai E_b/N_0 yang dibutuhkan untuk mencapai BER 10^{-4} adalah 31 dB, sedangkan pada 1024-QAM dibutuhkan nilai E_b/N_0 sebesar 26 dB. Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan simulasi dengan menambahkan *error control code* seperti LDPC dan Polar code. Penggunaan *error control code* dapat menurunkan nilai E_b/N_0 atau SNR yang dibutuhkan untuk mencapai target BER yang ditetapkan. Dengan demikian, daya (*power*) yang dibutuhkan oleh pengirim juga menjadi lebih rendah sehingga terjadi penghematan daya, terutama pada peralatan yang menggunakan baterai sebagai sumber dayanya.

5. Daftar Pustaka

- [1] Sklar, B. (2021). *Digital communications: fundamentals and applications*. Pearson.
- [2] Cox, C. (2012). *An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons.
- [3] Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M., & Chandramouli, D. (2019). 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE access*, 7, 127639-127651.
- [4] Mangold, S., Choi, S., May, P., Klein, O., Hiertz, G., & Stibor, L. (2002, February). IEEE 802.11 e Wireless LAN for Quality of Service. In *Proc. European Wireless* (Vol. 2, pp. 32-39).
- [5] Haykin, S. (2008). *Communication systems*. John Wiley & Sons.
- [6] Stallings, W. (2007). *Data and computer communications*. Pearson Education India.
- [7] Singya, P. K., Shaik, P., Kumar, N., Bhatia, V., & Alouini, M. S. (2021). A survey on higher-order QAM constellations: Technical challenges, recent advances, and future trends. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 617-655. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3067384.
- [8] Pratiwi, W., & Setyowati, E. Analisis Perbandingan 16-QAM dan 64-QAM Pada Kanal AWGN untuk Sistem Komunikasi Nirkabel. *Telecommunications, Networks, Electronics, and Computer Technologies (TELNECT)*, 1(2), 71-76.
- [9] Weller, D., Mensenkamp, R. D., van der Vegt, A., van Bloem, J. W., & de Laat, C. (2020, June). Wi-Fi 6 performance measurements of 1024-QAM and DL OFDMA. In *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-7). IEEE. DOI: 10.1109/ICC40277.2020.9149106.
- [10] Otsuka, H., Tian, R., & Senda, K. (2019). Transmission performance of an OFDM-based higher-order modulation scheme in multipath fading channels. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 8(2), 19.
- [11] Tian, R., Senda, K., & Otsuka, H. (2018, December). BER performance of OFDM-based 4096-QAM using soft decision Viterbi decoding in multipath fading. In *2018 IEEE World Symposium on Communication Engineering (WSCE)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/WSCE.2018.8690532.
- [12] Lu, C., Chen, S. L. C., Liu, J., Bao, J., Zhao, Y., Chien, C. M., ... & Wang, C. (2022, November). A dual-band 2x 2 802.11 ax transceiver supporting 160MHz CBW and 1024-QAM. In *2022 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)* (pp. 1-3). IEEE. DOI: 10.1109/A-SSCC56115.2022.9980678.
- [13] Kawai, S., Yamagishi, T., Hagiwara, Y., Saigusa, S., Seto, I., Otaka, S., & Ito, S. (2018). A 1024-QAM capable WLAN receiver with-56.3 dB image rejection ratio using self-calibration technique. *IEICE Transactions on Electronics*, 101(7), 457-463.
- [14] Tian, R., Ota, T., & Otsuka, H. (2018, January). Influence of phase error on OFDM-based 4096-QAM with turbo coding. In *2018 International Conference on Information Networking (ICOIN)* (pp. 352-355). IEEE. DOI: 10.1109/ICOIN.2018.8343139.

- [15] Hoefel, R. P. F. (2021, November). LLR metrics for 4096-QAM soft-decision: Implementation in IEEE 802.11 be (wi-fi 7). In *2021 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)* (pp. 1-6). IEEE. DOI: 10.1109/LATINCOM53176.2021.9647849.
- [16] Abid, F. A., al-Azzawi, F. F., Kamal, K. Y., & Ibrahim, M. S. (2023, January). 5G and 6G WiFi Transceiver Comparison in Multi Modulation Schemes Performance with MATLAB Simulink. In *2023 Third International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)* (pp. 1-7). IEEE. DOI: 10.1109/ICAECT57570.2023.10117736.
- [17] Hong, H., Xu, Y., Wu, Y. Y., Huang, Y., He, D., Li, H., & Zhang, W. (2022, December). Extend the Modulation Mapper with Odd-Bit Constellations for 6G Wireless Communications. In *2022 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)* (pp. 1664-1669). IEEE. DOI: 10.1109/GCWkshps56602.2022.10008624.