

Analisis Kinerja Jaringan 5G dengan Pengkodean QC-LDPC dan *Polar*

RENI DYAH WAHYUNINGRUM, MELINDA BR GINTING, KHOIRUN NI'AMAH,
SOLICHAH LARASATI

Institut Teknologi Telkom Purwokerto, Indonesia
Email: reni@ittelkom-pwt.ac.id

Received 24 Agustus 2023 | *Revised* 27 September 2023 | *Accepted* 1 November 2023

ABSTRAK

Jaringan 5G telah menjadi penanda penting dalam evolusi teknologi nirkabel yang menawarkan kecepatan dan kinerja yang luar biasa untuk memenuhi kebutuhan konektivitas yang semakin meningkat. Dalam jaringan 5G, pengkodean kanal merupakan elemen penting dalam memastikan pengiriman data yang handal dan efisien. Penelitian ini mengkaji sistem 5G pada frekuensi 26 GHz dan bandwidth 200 MHz menggunakan Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) dengan ukuran Fast Fourier Transform (FFT) sebesar 256 dan modulasi Binary Phase Shift Keying (BPSK). Penelitian ini mengevaluasi perbandingan penambahan channel coding yaitu QC-LDPC dan polar codes. Performansi QC-LDPC codes pada BER sebesar 10^{-4} dapat dicapai dengan SNR $\gamma = 17$ dB untuk kode QC-LDPC dan SNR $\gamma = 15$ dB untuk polar codes. Hasil menunjukkan bahwa penambahan channel coding mampu menangkap diversity order kedua dan performansi polar codes lebih baik dibandingkan dengan QC-LDPC.

Kata kunci: 5G, BPSK, OFDM, Polar, QC-LDPC

ABSTRACT

The 5G network has become a significant milestone in the evolution of wireless technology, offering remarkable speed and performance to meet the growing demands of connectivity. In the 5G network, channel coding is a crucial element to ensure reliable and efficient data transmission. This research evaluate the 5G network operating at a frequency of 26 GHz and a bandwidth of 200 MHz, utilizing Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) with an Fast Fourier Transform (FFT) size of 256 and Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulation. The research evaluates the comparison of adding channel coding using QC-LDPC and polar codes. The performance of QC-LDPC codes at a bit error rate (BER) of 10^{-4} can be achieved with an SNR of $\gamma = 17$ dB for QC-LDPC codes and an SNR of $\gamma = 15$ dB for polar codes. The results shows the addition of channel coding is capable of capturing second-order diversity, and polar codes outperforms QC-LDPC in terms of performances.

Keywords: 5G, BPSK, OFDM, Polar, QC-LDPC

1. PENDAHULUAN

Dalam komunikasi nirkabel, *multipath fading* menjadi fenomena pada komunikasi nirkabel dengan sinyal radio yang dikirimkan dari pemancar menuju penerima mencapai penerima melalui beberapa jalur berbeda yang memiliki panjang dan refleksi yang beragam **(Alencar, dkk, 2014)**. Fenomena ini dapat menyebabkan variasi cepat dalam kekuatan sinyal yang diterima oleh penerima, yang dapat mengakibatkan distorsi, degradasi, atau bahkan hilangnya sinyal **(Wahyuningrum, dkk, 2021)**. Penyebab terjadinya *multipath* termasuk perubahan fenomena lingkungan (seperti suhu, kelembapan, kecepatan hujan) dan pantulan dari objek-objek terestrial (seperti gunung dan bangunan) **(Wahyuningrum, dkk, 2021)**. Efek dari *multipath* termasuk interferensi konstruktif dan destruktif, serta pergeseran fasa sinyal. Jaringan *fifth generation* (5G) merupakan generasi terbaru dalam teknologi telekomunikasi nirkabel yang menjanjikan peningkatan kecepatan, kapasitas, *latency* yang rendah, serta dukungan untuk konektivitas massal dan *Internet of Things (IoT)* **(Osseiran, dkk, 2016)**. Salah satu tantangan utama dalam implementasi jaringan 5G adalah mengatasi interferensi dan gangguan pada kanal yang dapat mempengaruhi kualitas sinyal dan *throughput*. *Channel coding* merupakan salah satu solusi yang digunakan untuk meningkatkan *reliability* pada transmisi data untuk meminimalkan interferensi **(Arora, dkk, 2020)**. *Channel coding* adalah proses penambahan informasi redundan ke dalam data yang akan dikirimkan, sehingga jika terjadi gangguan atau distorsi selama transmisi, penerima masih dapat memulihkan data asli dengan lebih baik. Pada penelitian ini akan melakukan evaluasi jaringan 5G dengan teknik *multiplexing Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dan penambahan *channel coding Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check* (QC-LDPC) dan *polar codes* adalah dua jenis pengkodean yang sering digunakan dalam komunikasi nirkabel. CP-OFDM adalah variasi dari OFDM yang telah diadopsi dalam berbagai standar komunikasi, seperti Wi-Fi (802.11a/g/n/ac/ax), *Long-Term Evolution* (LTE), dan 5G **(Liu, dkk, 2020)**. CP-OFDM adalah teknik yang efektif dalam mengatasi *fading* dan *multipath* yang terjadi dalam komunikasi nirkabel **(Kongara, dkk, 2019)**.

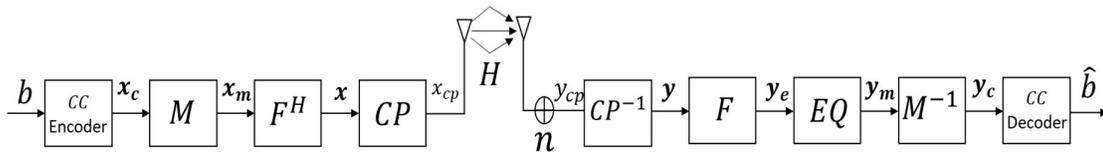
Polar codes adalah teknik pengkodean yang digunakan dalam komunikasi 5G untuk mengoptimalkan transmisi data dalam kondisi saluran nirkabel yang kompleks. *Polar codes* merupakan bagian penting dari standar 5G NR (New Radio) yang digunakan dalam jaringan seluler 5G. *Polar codes* adalah jenis pengkodean kanal yang dikenal karena efisiensinya dalam mendekati batas kapasitas saluran (*channel capacity*) dalam teori Informasi **(Dhuheir & Öztürk, 2018)**. *Polar codes* memungkinkan transmisi data dengan *bit error rate* (BER) yang rendah, bahkan dalam kondisi kanal yang tidak ideal. Selain *polar codes*, kode LDPC juga digunakan dalam 5G. Keduanya digunakan secara bersamaan dalam beberapa implementasi 5G untuk mencapai kinerja yang optimal dalam berbagai kondisi saluran. *Polar codes* digunakan dalam perangkat 5G, seperti *smart phone* dan modem 5G, untuk *encode* dan *decode* data yang dikirim dan diterima melalui kanal **(Bioglio, dkk, 2021)**.

QC-LDPC adalah pengkodean kanal yang memiliki kemampuan koreksi kesalahan yang tinggi **(Belhadj, dkk, 2021)**. *QC-LDPC codes* telah diadopsi sebagai bagian dari standar jaringan 5G untuk *channel coding*. Standarisasi ini memastikan interoperabilitas dan kompatibilitas diberbagai implementasi jaringan yang berbeda, mendorong jaringan 5G yang konsisten dan andal pada implementasinya. QC-LDPC adalah varian khusus dari LDPC yang digunakan pada 5G, kode LDPC menggunakan matriks paritas yang rendah dan tidak memiliki struktur tertentu **(Nozaki & Isaka, 2022)**. Pada penelitian ini menggunakan QC-LDPC yang memiliki struktur tertentu yang disebut sebagai *quasi-cyclic*, matriks paritas memiliki pola yang terstruktur, yang membuat lebih efisien dalam implementasi sistem. QC-LDPC menawarkan beberapa keunggulan untuk jaringan 5G, termasuk peningkatan performa, pemanfaatan spektrum yang

efisien, kompleksitas rendah, adaptabilitas, *diversity gain*, standarisasi, dan *future-proofing*. Atribut-atribut ini berkontribusi untuk menjadikan QC-LDPC sebagai solusi *channel coding* yang efektif dan dapat diandalkan dalam konteks sistem komunikasi 5G (Benson, dkk, 2020). QC-LDPC cenderung menawarkan kinerja BER yang lebih baik pada nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) yang lebih rendah dibandingkan dengan *convolutional codes* (Lakshmi, dkk, 2022). 5G juga dirancang untuk mendukung komunikasi pada saluran yang tidak terestrial, seperti satelit dan balon udara. QC-LDPC codes digunakan dalam skenario-skenario ini untuk menjaga konektivitas. QC-LDPC memiliki kemampuan yang baik dalam mendeteksi dan memperbaiki kesalahan walaupun memerlukan lebih banyak *bit redundant* untuk mencapai tingkat koreksi kesalahan dibandingkan dengan *polar codes*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja pengkodean QC-LDPC dan *polar codes* pada jaringan 5G dalam menghadapi berbagai tantangan komunikasi, seperti interferensi dan *multipath fading*. Analisis kinerja jaringan 5G dengan pengkodean QC-LDPC dan *polar* menjadi sangat penting untuk memahami sejauh mana kedua teknik ini dapat meningkatkan kualitas transmisi dan kinerja jaringan secara keseluruhan. Melalui analisis ini, dapat dievaluasi nilai BER pada frekuensi 26 GHz dengan *multipath fading* yang disesuaikan dengan keadaan lingkungan di Indonesia. Dengan pemahaman yang mendalam tentang pengkodean QC-LDPC dan *polar codes* dalam konteks jaringan 5G, penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang berharga dalam pengembangan sistem komunikasi nirkabel yang lebih baik dan dapat diandalkan. Informasi ini akan sangat berharga dalam perancangan dan pengembangan jaringan 5G yang lebih baik, serta dalam memahami sejauh mana teknologi pengkodean dapat diimplementasikan secara efisien dalam jaringan komunikasi yang ada.

2. METODE

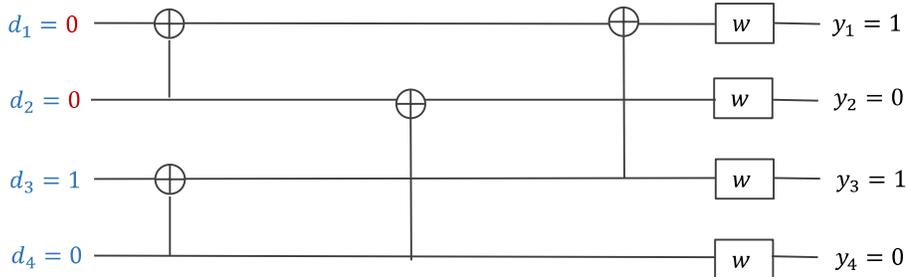


Gambar 1. Blok Sistem Model 5G.

Gambar 1 menunjukkan blok sistem model jaringan 5G dengan penambahan *channel coding*. Pada sisi pengirim, *bit stream* b masuk ke dalam blok *CC encoder* untuk penambahan bit redundan dengan keluaran x_c menggunakan *channel coding Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check* (QC-LDPC) dan *polar codes* dengan *coding rate* $R = 1/3$. M adalah blok modulasi yang menggunakan *modulator Binary Phase Shift Keying* (BPSK), bit informasi akan dipetakan dan dimodulasi untuk menghasilkan simbol x_m . Simbol yang telah termodulasi kemudian ditransformasi menggunakan *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) F^H dengan panjang blok sejumlah 256 blok. Modul CP menambah simbol x hasil transformasi dengan *cyclic prefix* (CP) menjadi x_{cp} . Simbol OFDM kemudian ditransmisikan pada H kanal *multipath fading*. Nilai $H = \{1, 0,02, 0,07, 0,003, 0,01, 0,004, 0,0004, 0,0005, 0,0008, 0,0005, 0,0001, 0,0001, 0,0001\}$ nilai H yang digunakan pada penelitian ini telah disesuaikan dengan keadaan lingkungan di Indonesia yang didapatkan dari simulasi. Pada sisi penerima, simbol yang diterima akan terkena *noise* n sebelum simbol y_{cp} masuk pada modul CP^{-1} dan menjadi simbol baru y . Simbol y akan ditransformasikan kembali menggunakan modul F yaitu *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk menghasilkan simbol y_e . Pada blok EQ simbol y_m yang telah di ekuivalisasi didemodulasi M^{-1} menggunakan *demodulator* BPSK untuk menghasilkan bit-bit y_c . Modul *CC decoder* untuk mendecode bit akhir sebagai proses akhir OFDM dengan *channel coding polar codes* atau QC-

BG. Matriks berukuran 46×68 dari BG1 dengan $R = 1/3$ digunakan dalam tesis ini. Gambar 3 mengilustrasikan *bipartite graph* dari QC-LDPC codes berdasarkan BG1. Edges E terhubung dengan *check node degree* (CND) dan *variable node degree* (VND) untuk melakukan *iterative decoding*.

2.2 Polar Codes



Gambar 4. Polar Codes dengan Panjang 4 Bit

Polar codes merupakan salah satu jenis pengkodean *linear block code* yang berguna untuk mengoreksi kesalahan dalam pengiriman data (Prahland, dkk, 2020). *Polar codes* memiliki konstruksi kode yang dapat dilakukan dengan mudah dan memiliki kompleksitas yang rendah. Konstruksi kode didasarkan pada beberapa perulangan dari rangkaian kode kernel yang mengubah kanal fisik menjadi kanal virtual. Ketika jumlah rekursif banyak, kanal virtual cenderung memiliki reliabilitas tinggi atau rendah, disebut dengan polarisasi. Karena itu, sistem pengkodean ini menggunakan kata Polar sebagai nama kodenya. *Polar codes* pertama kali diusulkan oleh Erdal Arıkan dengan menggunakan kanal *Binary Input Discrete Memoryless* (Bioglio, dkk, 2021).

Encoder melakukan pengkodean bit, sebelum bit tersebut dikirimkan menjadi *bit encoded*. *Polar Encoder* menggunakan operasi bilangan XOR matriks antar bit konstruksi dengan matriks generator yang sesuai dengan panjang blok dari bit konstruksi tersebut. Berdasarkan Gambar 4, skema *encoding Polar codes* dapat dirumuskan dengan Persamaan (1).

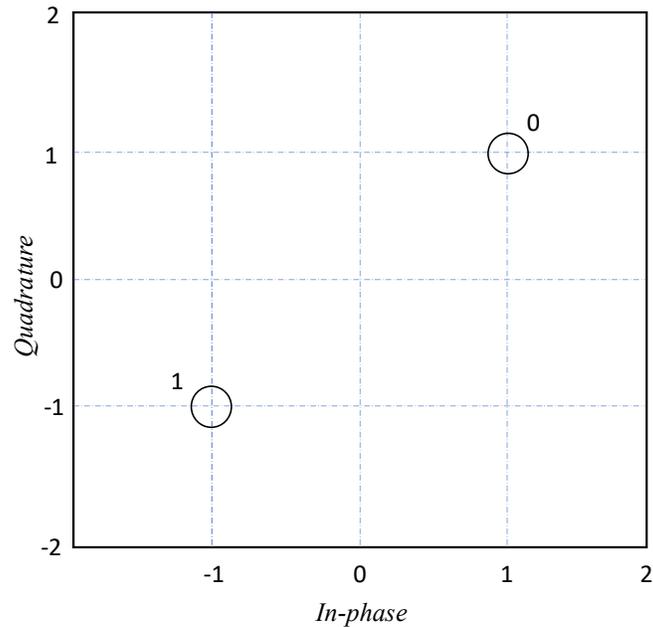
$$y_n = d_n \times G_n = [0 \ 0 \ 1 \ 0] \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = [1 \ 0 \ 1 \ 0] \quad (1)$$

d adalah bit yang masuk terdiri atas bit Informasi dan bit frozen, y adalah hasil operasi XOR antar bit U atau hasil dari proses encoding, sementara G_m adalah matriks generator yang dapat meluas berdasarkan hasil pemangkatan Knonecker k sesuai dengan panjang bloknya dan w adalah kapasitas kanal. Setelah dilakukannya encode pada transmitter maka pada receiver akan dilakukan decode. Decoder adalah teknik pengkodean dari bit/data yang diterima di kanal yang kemudian dikodekan menjadi bit yang sama sesuai dengan bit yang dikirimkan.

2.3 Modulasi Binary Phase Shift Keying (BPSK)

Penelitian ini menggunakan modulasi BPSK, namun pengembangan pada modulasi yang lebih tinggi tetap memungkinkan. Pada blok ini, Simbol M yang telah dimodulasi dikirim melalui kanal dan diterima pada receiver. Gambar 5 menunjukkan *mapper* untuk mengambil bit 0 dan 1 sebagai *input* pada *transmitter* dan menghasilkan nilai kompleks dengan *output* sebagai nilai simbol. *Codeword* $c(k)$ dipetakan pada modulasi kompleks simbol x berdasarkan Persamaan 2 (Kumar & Krishnan, 2022).

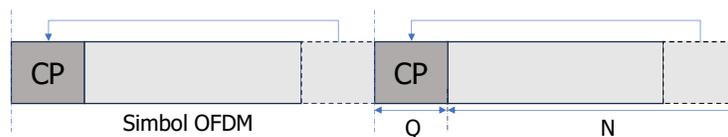
$$X(k) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2c(k)) + j(1 - 2c(k))] \quad (2)$$



Gambar 5. Konstelasi Modulasi BPSK.

2.4 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

Penelitian ini menggunakan teknik *multiplexing* OFDM dengan ukuran *Fast Fourier Transform* (FFT) sebesar 256. OFDM adalah salah satu teknik *multiplexing* yang digunakan dalam komunikasi nirkabel, terutama dalam sistem seperti Wi-Fi, 4G/5G, dan teknologi lainnya. OFDM digunakan untuk menggabungkan beberapa subkanal frekuensi kecil (*subcarrier*) untuk mentransmisikan data secara bersamaan. Setiap *subcarrier* membawa informasi yang terpisah, dan dengan demikian, kapasitas saluran dapat ditingkatkan dengan memanfaatkan banyak *subcarrier* ini (Venkatesan & Valenzuela, 2016). *Cyclic Prefix* (CP) yang disertakan dalam OFDM berperan dalam mengatasi redaman *multipath* dan menghindari interferensi antara simbol. Dengan menggabungkan *multiplexing* dan penggunaan *cyclic prefix*, OFDM menciptakan metode transmisi yang efisien dan andal untuk berkomunikasi dalam komunikasi nirkabel (Lavanya, dkk, 2019). Gambar 6 menunjukkan pada awalan simbol OFDM yang merupakan pengulangan bagian akhir dari simbol OFDM, dimana Q adalah panjang CP dan panjang simbol informasi dinyatakan dalam N .



Gambar 6. Ilustrasi dari OFDM.

2.5 Fast Fourier Transform (FFT)

FFT merupakan proses pemisahan antara frekuensi *carrier* dengan simbol *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) yang diterima pada sisi *receiver* sebelum didemodulasi dan diubah kembali ke dalam bentuk bit informasi. FFT juga digunakan untuk implementasi discrete fourier transform agar lebih cepat dan efisien. Ukuran FFT (FFT *size*) mengacu pada jumlah *subcarrier* dari simbol OFDM yang diharapkan dapat sesuai ukuran 2^N , N adalah jumlah

sampel yang diubah dari domain waktu ke domain frekuensi. Ukuran FFT ditentukan dengan memperhatikan keseimbangan antara perlindungan terhadap efek *multipath*, pergeseran Doppler (*Doppler shift*), dan kompleksitas sistem. Ukuran FFT yang besar dalam sistem 5G NR mampu mengurangi *subcarrier spacing* dan menambah durasi simbol. Hal ini akan memudahkan dalam perlindungan simbol OFDM dari interferensi akibat *multipath*. Di sisi lain, berkurangnya *subcarrier spacing* akan membuat sistem lebih rentan terhadap *intercarrier interference* (ICI) akibat efek *Doppler spread* dalam sistem komunikasi nirkabel (**Marijanovic, dkk, 2018**).

2.6 Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)

Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) merupakan proses untuk menghasilkan simbol-simbol OFDM pada sisi *transmitter* dengan frekuensi dari setiap informasinya akan dibuat saling tegak lurus (*orthogonal*). IFFT mengubah sebuah spektrum, yaitu amplitudo dan fasa dari setiap sinyal informasi ke bentuk sinyal dalam domain waktu. IFFT mengubah sejumlah simbol bernilai kompleks ke dalam domain waktu dengan jumlah simbol yang masih sama. *Subcarrier* yang *orthogonal* pada IFFT digunakan dalam sinyal OFDM agar dapat mengatur amplitudo dan fasa dari setiap simbol dengan mudah (**Bodkhe, 2018**).

2.7 Kanal Frequency-flat Rayleigh Fading

Pada penelitian ini mengansumsikan komunikasi nirkabel dengan transmisi *narrowband* maka dari itu kanal *frequency-flat Rayleigh fading* digunakan pada penelitian ini. Distribusi *Rayleigh* menggambarkan variasi waktu merubah statistik alami pada sinyal terima (**Heider, 2018**). Distribusi ini mendeskripsikan fluktuasi sinyal *Rayleigh* pada kondisi fungsi distribusi dari daya terima ternormalisasi. Probabilitas fungsi densiti pada distribusi Rayleigh dituliskan dengan Persamaan 3.

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3)$$

dengan σ^2 adalah varians dari sinyal terima dan r^2 adalah sinyal terima.

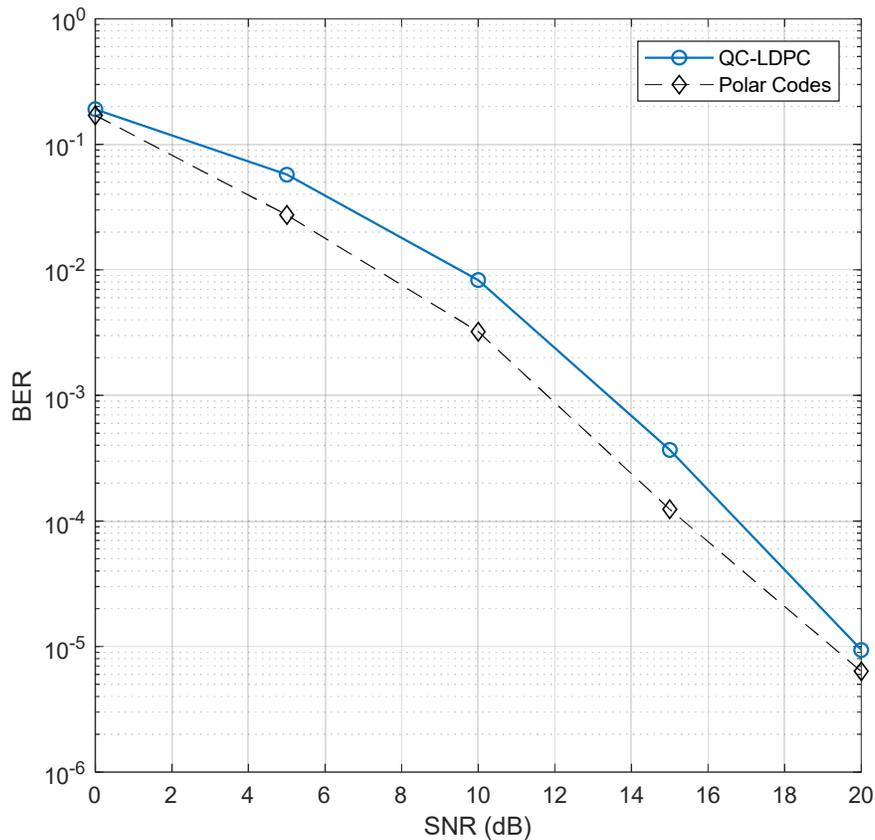
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini menggunakan model kanal 5G yang telah disimulasikan dengan menyesuaikan dengan karakteristik lingkungan di Indonesia. Karakteristik lingkungan didapatkan dari data di Jawa Tengah pada bulan Januari-Mei 2022 dengan kelembapan udara rata-rata sebesar 83,12%, suhu udara rata-rata sebesar 29,30°C, curah hujan sebesar 8,35 mm/hr, dan tekanan udara rata-rata sebesar 1010 mbar. Parameter lingkungan tersebut menjadi data inputan pada simulator dengan parameter frekuensi sebesar 26 GHz dan bandwidth 100 MHz. Hasil dari simulasi tersebut menghasilkan model kanal 5G yang diperoleh berdasarkan *representative Power Delay Profile* (PDP) sebanyak 13 *path*.

Pada penelitian ini menampilkan kinerja dari *bit error rate* (BER) pada *channel coding* pada $R = 1/3$ dengan sistem OFDM dengan ukuran FFT sebesar 256. BER adalah persentase dari bit terima yang *error* dibandingkan dengan jumlah total simbol yang ditransmisikan yang didefinisikan pada Persamaan 4.

$$BER = \frac{e}{k}, \quad (4)$$

dengan e adalah jumlah bit *error* dan k adalah jumlah bit yang ditransmisikan.



Gambar 7. BER Sistem 5G dengan Pengkodean QC-LDPC dan *Polar Codes*.

Gambar 7 menunjukkan kinerja BER dari OFDM dengan modulasi *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) 5G menggunakan *polar codes* dan QC-LDPC *codes* sebagai *channel coding*. BER dievaluasi untuk tingkat $R = 1/3$ dengan sumbu x menunjukkan nilai SNR dan sumbu y menunjukkan BER dari $10^0 - 10^{-5}$. Garis *solid* biru dengan tanda bulat menunjukkan kinerja sistem 5G menggunakan QC-LDPC *codes* dan garis putus-putus berwarna hitam dengan tanda *square* menunjukkan kinerja dari *polar codes*. Sistem 5G dengan QC-LDPC *codes* dan *polar codes* dapat mencapai *diversity* orde dua. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan *channel coding* baik pada sistem untuk mengatasi kesalahan dalam saluran komunikasi. Semakin tinggi *diversity order*, maka semakin baik sistem dalam menghadapi gangguan dan mengurangi *error*. Meskipun *polar codes* dan QC-LDPC *codes* mencapai *diversity* orde dua yang sama, kedua *channel coding* tersebut lebih efektif dalam kanal tertentu dan kurang efektif dalam kanal lainnya. Kedua *channel coding* tersebut memiliki tingkat kompleksitas yang berbeda dalam implementasinya, yang dapat memengaruhi pilihan dalam aplikasi dunia nyata. Evaluasi kinerja pada nilai BER sebesar 10^{-4} dari sistem 5G dapat dicapai dengan SNR $\gamma = 17$ dB untuk kode QC-LDPC dan SNR $\gamma = 15$ dB untuk *polar codes*. Kinerja BER dari sistem 5G dengan *polar codes* memiliki kinerja yang lebih bagus dibandingkan dengan QC-LDPC *codes*. Penambahan *channel coding* pada sistem 5G dapat meningkatkan efisiensi pada nilai *signal to noise ratio* (SNR). Pemilihan antara QC-LDPC *codes* dan *polar codes* untuk pengimplementasian pada aplikasi harus didasarkan pada kebutuhan aplikasi khusus. Beberapa aplikasi mungkin lebih cocok dengan salah satu jenis *codes* berdasarkan karakteristik

kanal dan persyaratan kinerja yang lebih spesifik. Hal tersebut dikarenakan *polar codes* dan QC-LDPC merupakan *channel coding* yang handal dalam mengoreksi kesalahan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi kinerja jaringan 5G dengan sistem OFDM menggunakan ukuran FFT sebesar 256, modulasi BPSK, dan penambahan dua *channel coding*. *Channel coding* yang digunakan pada penelitian ini adalah QC-LDPC dan *polar codes*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada sistem 5G dengan penambahan *channel coding* dapat meningkatkan efisiensi pada nilai SNR dengan mencapai *diversity order* dua. Hal ini menunjukkan sistem komunikasi pada kanal 5G dapat mencapai perbaikan kinerja yang lebih baik untuk mengatasi *fading effect* pada kanal. Sehingga, mampu mengatasi gangguan dan kondisi buruk dalam komunikasi nirkabel. Performansi QC-LDPC *codes* pada BER sebesar 10^{-4} dapat dicapai dengan SNR $\gamma = 17$ dB untuk kode QC-LDPC dan SNR $\gamma = 15$ dB untuk *polar codes*. Semakin besar nilai SNR QC-LDPC *codes* maka nilai BER semakin besar, tetapi pada *polar codes* jika nilai SNR semakin besar maka nilai BER semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa performansi dengan *polar codes* lebih baik dibandingkan dengan QC-LDPC *codes*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Institut Teknologi Telkom Purwokerto yang telah mendukung penelitian ini.

DAFTAR RUJUKAN

- 3GPP. (2020). 5G ; NR; Multiplexing and channel coding Release 16. *TS 38.212 Version 16.2.0*, 0. <https://portal.etsi.org/TB/ETSIDeliverableStatus.aspx>
- Alencar, R. T. De, & Ara, M. De. (2014). *Modulation Diversity Effects in Rayleigh Fading Multipath Channels*. August, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ITS.2014.6948018>
- Arora, K., Singh, J., & Randhawa, Y. S. (2020). A survey on channel coding techniques for 5G wireless networks. *Telecommunication Systems*, 73(4), 637–663. <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00630-3>
- Belhadj, S., Lakhdar, A. M., & Bendjillali, R. I. (2021). Performance comparison of channel coding schemes for 5G massive machine type communications. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 22(2), 902. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v22.i2.pp902-908>
- Benson, P. M., Titus, T. J., & Yuvaraju, M. (2020). BER Analysis of Channel Coding Techniques for 5G Networks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 932(1), 012091. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012091>

- Bioglio, V., Condo, C., & Land, I. (2021). Design of Polar Codes in 5G New Radio. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), 29–40. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2967127>
- Bodkhe, V. D. (2018). *Implementation of FFT/IFFT Blocks for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*. 5.
- Dhuheir, M., & Öztürk, S. (2018). *Polar Codes Applications for 5G Systems*. *Journal of Institute Of Science and Technology*, 34(3), 49–65.
- Heider, I. A. (2018). Improvement of Fading Channel Modeling Performance for Wireless Channel. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(3), 1451. <https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1451-1459>
- Kongara, G., He, C., Yang, L., & Armstrong, J. (2019). A Comparison of CP-OFDM, PCC-OFDM and UFMC for 5G Uplink Communications. *IEEE Access*, 7, 157574–157594. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2949792>
- Kumar, A., & Krishnan, P. (2022). RoFSO system based on BCH and RS coded BPSK OFDM for 5G applications in smart cities. *Optical and Quantum Electronics*, 54(1), 0–17. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03392-y>
- Lakshmi, M. V., Reddy, G. G., Sucharitha, A., Akshara, N., & Vaishnavi, N. (2022). Performance Comparison of Channel Coding Techniques for OFDM System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1272(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1272/1/012012>
- Lavanya, P., Satyanarayana, P., & Ahmad, A. (2019). Suitability of OFDM in 5G Waveform – A Review. *Oriental Journal of Computer Science and Technology*, 12(Issue 3), 66–75. <https://doi.org/10.13005/ojcs12.03.01>
- Liu, X., Xu, T., & Darwazeh, I. (2020). Coexistence of Orthogonal and Non-orthogonal Multicarrier Signals in Beyond 5G Scenarios. *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083780>
- Marijanovic, L., Schwarz, S., & Rupp, M. (2018). Optimal Numerology in OFDM Systems Based on Imperfect Channel Knowledge. *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2018.8417548>
- Nozaki, T., & Isaka, M. (2022). LDPC Codes for Communication Systems: Coding Theoretic Perspective. *IEICE Transactions on Communications*, E105.B(8), 894–905. <https://doi.org/10.1587/transcom.2021EBI0001>
- Prahland, D., Puthuraya, A., Srinivasan, G., Harsh, K., & Reddy, K. (2023). Polar Coding in 5G Systems. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 5(5), 2582–4376.

- Osseiran, A., Monserrat, J. F., & Marsch, P. (2016). 5G Mobile and Wireless Communications Technology. New York : Cambridge University Press
- Venkatesan, S., & Valenzuela, R. A. (2016). OFDM for 5G: Cyclic prefix versus zero postfix, and filtering versus windowing. *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7510757>
- Wahyuningrum, R. D., Ni'Amah, K., & Larasati, S. (2021). Model Kanal 5G dengan Pengaruh Kelembapan pada Frekuensi 3,3 GHz dan Bandwidth 99 MHz Berbasis Convolutional Codes. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(4), 878. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v9i4.878>
- Wahyuningrum, R. D., Pramudya, D., & Permatasari, I. (2021). 5G Channel Model Under the Effect of Human Blockage at 3.5 GHz Frequency. *CESS (Journal of Computer Engineering, System and Science)*, 7(1), 31. <https://doi.org/10.24114/cess.v7i1.27291>
- Xu, J., Yuan, Y., & Yang, C. (2022). *Channel Coding in 5G New Radio* (1 ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003336174>