

Analisis Kinerja FBMC OQAM menggunakan Kode Konvolusi

MIFTAKHUDIN YUSUF, ANGGUN FITRIAN ISNAWATI, SOLICHAH LARASATI

Institut Teknologi Telkom Purwokerto, Indonesia
Email: 17101024@ittelkom-pwt.ac.id

Received 5 April 2021 | *Revised* 1 Mei 2021 | *Accepted* 12 Mei 2021

ABSTRAK

Sistem FBMC merupakan teknologi MCM yang dapat menyediakan laju data bit yang tinggi. Modulasi digital OQAM digunakan untuk meningkatkan bit rate. Pengkodean kanal digunakan untuk mengoreksi kesalahan yang diakibatkan noise. Penelitian ini menggunakan pengkodean kanal kode konvolusi yang digunakan pada bagian pengirim dan algoritma viterbi pada bagian penerima. Simulasi dilakukan pada FBMC OQAM dengan kode konvolusi dan tanpa kode konvolusi dengan perbandingan parameter BER dan kapasitas kanal terhadap SNR. Hasil penelitian menunjukkan FBMC OQAM dengan kode konvolusi lebih baik daripada FBMC OQAM tanpa kode konvolusi pada SNR tinggi. Pada FBMC OQAM untuk mencapai BER 10^{-3} membutuhkan SNR 17 dB sedangkan pada FBMC OQAM dengan kode konvolusi membutuhkan SNR 16 dB. Peningkatan SNR dapat meningkatkan kapasitas kanal yang dihasilkan, pada SNR 0 dB menghasilkan 0,4535 bps/Hz dan SNR 20 dB menghasilkan 5,858 bps/Hz.

Kata kunci: kode konvolusi, algoritma viterbi, FBMC, OQAM, BER

ABSTRACT

The FBMC system is an MCM technology that can provide high bit data rates. OQAM digital modulation is used to increase the bit rate. Channel coding is used to correct errors caused by noise. This research uses convolutional code channel coding used on the sender and viterbi algorithms on the receiver. Simulations are carried out on FBMC OQAM with convolutional code and without convolutional code with a comparison of BER parameters and channel capacity to SNR. The results showed that FBMC OQAM with convolutional code was better than FBMC OQAM without convolutional code at high SNR. In FBMC OQAM to reach BER 10^{-3} requires SNR of 17 dB while in FBMC OQAM with convolutional code requires SNR of 16 dB. Increasing SNR can increase the resulting channel capacity, at 0 dB SNR it produces 0.4535 bps / Hz and SNR 20 dB produces 5.858 bps / Hz.

Keywords: convolutional code, viterbi algorithm, FBMC, OQAM, BER

1. PENDAHULUAN

Pada komunikasi sistem komunikasi digital pasti akan terjadi gangguan atau *noise* pada saluran transmisi. *Noise* yang timbul pada sistem komunikasi dapat mempengaruhi kualitas data yang diterima. Untuk mengurangi *noise* maka dibutuhkan pengkodean kanal atau *channel coding* yang digunakan untuk mendeteksi kesalahan dan mengoreksi kesalahan sehingga akan mendapatkan *Quality of Service* (QoS) yang diinginkan **(Utomo, dkk, 2015)**. Pengkodean kanal merupakan suatu teknik untuk menekan kesalahan data yang ditransmisikan secara *wireless* dengan cara menambahkan bit redundansi pada data yang dikirimkan. Terdapat beberapa metode pengkodean kanal, kode konvolusi merupakan pengkodean kanal yang banyak digunakan karena kode konvolusi memiliki kinerja yang lebih baik daripada jenis pengkodean kanal *block code* dengan pengkodean yang sebanding **(Pushpa, dkk, 2017)**. Hasil penelitian **(Utomo, dkk, 2015)** dengan menggunakan kode konvolusi lebih pada daripada tanpa kode konvolusi pada sistem OFDM, dimana untuk mencapai BER 10^{-3} pada kanal AWGN menggunakan kode konvolusi membutuhkan Eb/No 6 dB, sedangkan *uncoded* sistem membutuhkan Eb/No 10 dB. Penelitian **(Prayoga, dkk, 2017)** membahas penggunaan kode konvolusi pada sistem MC-DSSS dan menunjukkan hasil lebih baik menggunakan kode konvolusi daripada tanpa kode konvolusi dimana untuk mencapai BER 10^{-3} pada sistem *coded* membutuhkan Eb/No -7 dB dan pada sistem *uncoded* sebesar -3 dB.

Untuk mengoptimalkan kinerja komunikasi *wireless*, dibutuhkan teknologi *Multi Carrier Modulation* (MCM) atau modulasi pembawa jamak. MCM merupakan teknologi yang membagi *bandwidth* kanal menjadi beberapa subkanal **(Isnawati & Hendry, 2019)**. Salah satu jenis dari MCM yaitu *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), OFDM membagi kanal pita sempit dengan memanfaatkan lebar pita yang tersedia, kanal pita sempit biasa disebut dengan istilah *subcarrier*. Masing-masing *subcarrier* bersifat bebas satu dari yang lainnya (*orthogonal*). Apabila seluruh *subcarrier* memenuhi syarat orthogonalitas, maka spektrum dapat saling tumpang tindih tanpa menimbulkan interferensi, sehingga dapat menghemat spektrumnya **(Lynn & Calvinus, 2017)**.

Pada OFDM terdapat kekurangan yang dimilikinya, yaitu mudah terganggu oleh distorsi linier dan kompleksitas implementasi *Fast Fourier Transform* (FFT) pada sisi *receiver* serta sensitif terhadap frekuensi *offset* pembawa **(Hendry & Isnawati, 2019)**. Oleh karena itu muncul sebuah metode baru, yaitu *Filter Bank Multi Carrier* (FBMC), FBMC merupakan modifikasi dari sistem OFDM, pada FBMC menggunakan orthogonalitas untuk *sub-channel* tetangga saja. Sistem FBMC juga dapat menghemat *bandwidth* sedikit lebih kecil daripada OFDM dikarenakan pada sistem FBMC tidak menggunakan *Cyclic Prefix* (CP). Oleh sebab itu, FBMC direkomendasikan untuk komunikasi 5G karena dapat menghemat *bandwidth* dan kapasitasnya tinggi atau besar **(Isnawati & Hendry, 2019)**.

Penggunaan modulasi untuk komunikasi *wireless* biasanya menggunakan modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), penggunaan QAM dikarenakan lebih efisien dalam pemakaian *bandwidth* dibandingkan modulasi lainnya. Pada modulasi QAM juga terdapat kekurangannya, yaitu *decision* yang rumit dan *bit rate* yang rendah serta masih terdapat *Intercarrier Interference* (ICI) **(Ramadiansyah, 2017)**. Sekarang muncul metode modulasi baru, yaitu *Offset Quadrature Amplitude Modulation* (OQAM) yang memiliki *decision* lebih baik dan *bit rate* yang lebih tinggi **(Hendry & Isnawati, 2019)**.

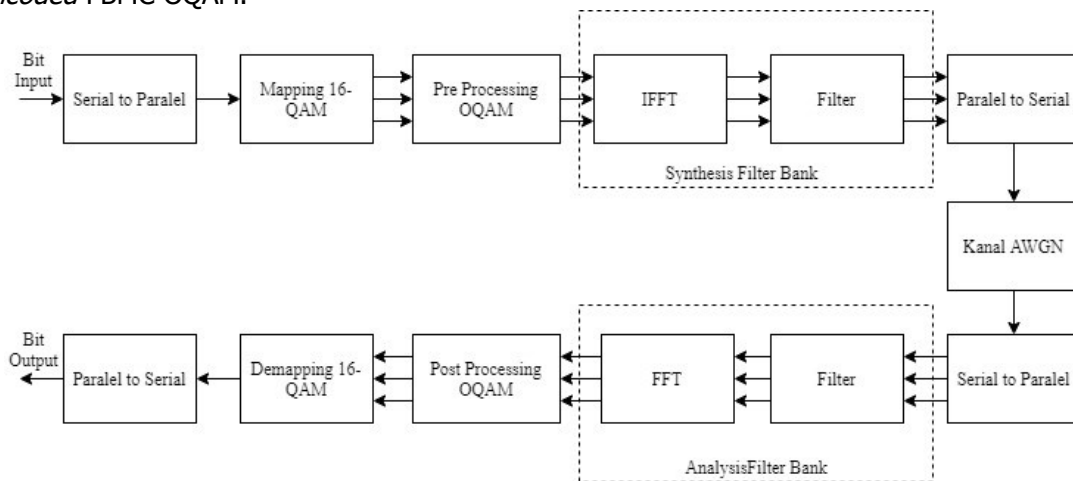
Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kinerja sistem FBMC OQAM dengan menggunakan kode konvolusi dan sistem FBMC OQAM tanpa kode konvolusi serta

membandingkan kinerja dari kedua sistem tersebut. Penggunaan kode konvolusi digunakan pada sisi pengirim sedangkan untuk sisi penerima menggunakan algoritma viterbi.

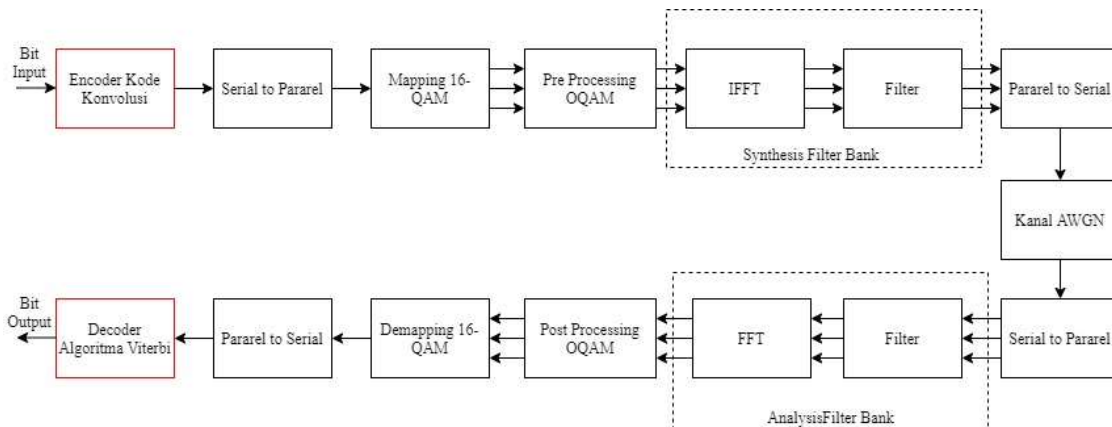
2. METODOLOGI

2.1 Pemodelan Sistem

Tahap pertama penelitian ini yaitu membuat pemodelan sistem yang digunakan seperti yang dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Kedua pemodelan sistem tersebut merupakan pemodelan sistem *uncoded* FBMC OQAM dan pemodelan sistem *coded* FBMC OQAM dengan kode konvolusi. Parameter *Signal to Noise Ratio* (SNR), *Bit Error Rate* (BER) dan kapasitas kanal digunakan sebagai parameter pengujian sistem. Analisis dilakukan dengan membandingkan unjuk kerja parameter BER dan kapasitas kanal terhadap SNR pada sistem FBMC OQAM, baik sistem *coded* FBMC OQAM menggunakan kode konvolusi maupun *uncoded* FBMC OQAM.



Gambar 1. Pemodelan Sistem *Uncoded* FBMC OQAM



Gambar 2. Pemodelan Sistem *Coded* FBMC OQAM

Data masukan pada penelitian ini berupa simbol acak 0 dan 1 yang merupakan simbol dari sinyal digital. Bit data yang dibangkitkan sebanyak 45000 bit dengan menggunakan perintah *randn* pada *software* Matlab. Berikut parameter simulasi untuk penelitian ini:

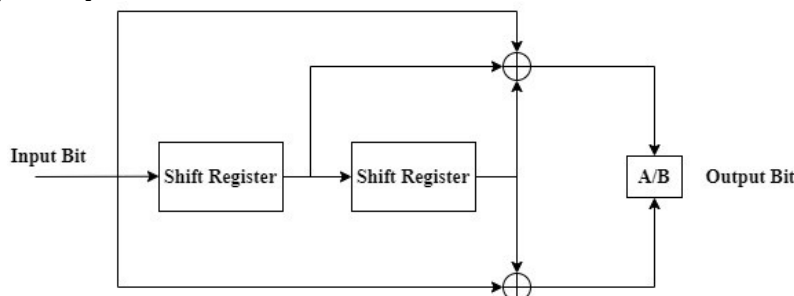
Tabel 1. Parameter Simulasi

Parameter	Nilai
Bit <i>Input</i>	45000
<i>Code Rate</i> Konvolusi	$\frac{1}{2}$
<i>Generator Polinomial</i>	[7 5]
Algoritma Viterbi	Hard decision
<i>Mapping</i>	16 QAM
Jumlah Antena Pengirim	1
Jumlah Antena Penerima	1

2.2 Kode Konvolusi

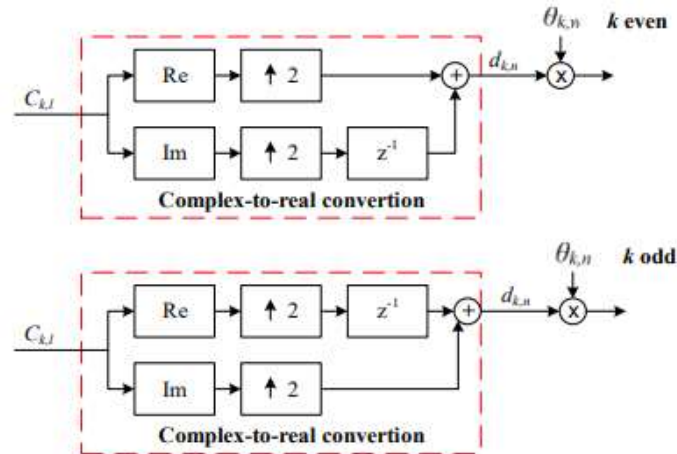
Pada proses kode konvolusi, data *input* yang berupa bit masuk secara kontinu akan menghasilkan beberapa bit *output* yang kontinu juga. Bit *output* yang dihasilkan tergantung dari bit *input* sebelumnya (**Prayoga, dkk, 2017**). Maka dengan itu kode konvolusi membutuhkan memori berupa *shift register*. Selain *shift register*, komponen utama lainnya pada kode konvolusi yaitu gerbang XOR, dimana gerbang logika XOR berupa *adder* (**Zain, dkk, 2013**).

Code rate pada kode konvolusi k/n menunjukkan bahwa kode konvolusi tersebut memiliki bit *input* k dengan n sebagai bit outputnya dengan syarat jumlah *output* lebih besar daripada jumlah *input* ($n > k$). Kode konvolusi didefinisikan dengan $C(n,k,m)$ dengan jumlah bit *input* k , jumlah bit *output* n dan memori m (**Elvia, dkk, 2015**). Selain itu kode konvolusi didefinisikan sebagai *generator polinomial*, hal ini karena *generator polinomial* mendefinisikan aspek dari kode konvolusi yaitu panjang memori, jumlah keluaran bit (jumlah *modulo-2 adder*) dan koneksi antara *shift register* dengan gerbang logika XOR (**Mahyadi & Arifin, 2011**). Berikut blok *encoder* kode konvolusi dengan *code rate* $\frac{1}{2}$ (**Mamiiek & Moegiharto, 2014**):

**Gambar 3. Blok Diagram Encoder Kode Konvolusi**

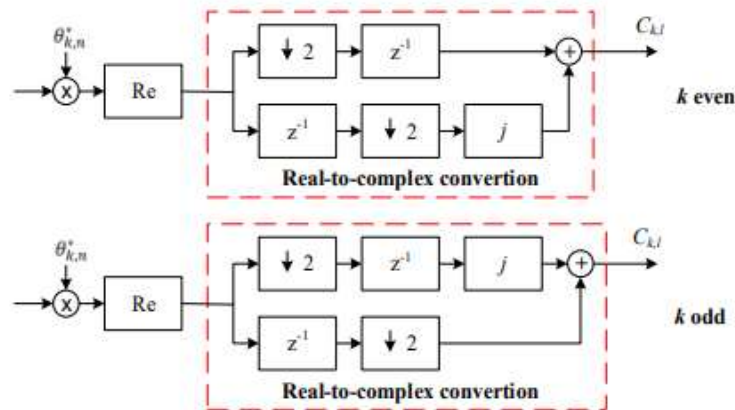
2.3 Modulasi OQAM

Pada modulasi OQAM terdapat 2 tahap, yaitu tahap pra pengolahan OQAM dan tahap pasca pengolahan OQAM. Pada pra pengolahan OQAM terdapat 2 tahapan, tahapan yang pertama yaitu mengubah bilangan kompleks menjadi bilangan riil, bilangan riil dan imajiner dari bilangan kompleks dipisahkan lagi untuk menjadi 2 simbol baru, simbol-simbol baru tersebut memiliki urutan yang tergantung dari nomor *subchannel*-nya. Proses konversi dari kompleks ke riil berbeda-beda untuk setiap *subchannel*-nya, tergantung dengan urutan *channel*, apakah *subchannel* ganjil atau *subchannel* genap. Proses ini juga dinamakan dengan proses *staggering*. Tahapan kedua yaitu penggandaan seperti Gambar 4 (**Hendry & Isnawati, 2019**).



Gambar 4. Pra Pengolahan OQAM

Tahapan dari pasca pengolahan OQAM sama seperti tahapan pra pengolahan OQAM, namun 2 tahapan pada pasca pengolahan OQAM merupakan kebalikan dari tahapan pra pengolahan OQAM. Tahapan pertama pada pasca pengolahan OQAM yaitu perkalian dengan *conjugate* dari $\theta_{k,n}$ untuk mendapatkan bilangan riil. Tahapan kedua yaitu mengubah bilangan riil menjadi bilangan kompleks, 2 simbol riil berturut-turut (1 simbol dikalikan dengan j) akan membentuk simbol kompleks, proses ini dinamakan juga dengan proses *destragging*. Mengubah bilangan kompleks menjadi bilangan riil menurunkan laju sampel dengan faktor 2. Tahap pasca pengolahan OQAM ditunjukkan pada Gambar 5 (Hendry & Isnawati, 2019).



Gambar 5. Pasca Pengolahan OQAM

2.4 Filter Bank Multicarier (FBMC)

Sistem FBMC terdiri dari 2 proses utama, yaitu pra pemrosesan dan pasca pemrosesan. Pada pra pemrosesan terdapat proses *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dan proses filter. Pra pemrosesan juga dinamakan sebagai *synthesis filter bank*, *synthesis filter bank* berfungsi untuk memisahkan sinyal berdasarkan frekuensinya. Filter yang digunakan pada pra pemrosesan dapat menggunakan berbagai jenis filter (Hendry & Isnawati, 2019).

Pasca pemrosesan terdiri dari proses filter dan proses *Fast Fourier Transform* (FFT), proses ini juga disebut sebagai *analysis filter bank*. Filter yang digunakan harus sesuai dengan filter yang digunakan pada *synthesis filter bank*. Fungsi *analysis filter bank* merupakan kebalikan

dari *synthesis filter bank* yaitu berfungsi untuk menggabungkan sinyal berdasarkan frekuensinya.

2.5 Kanal AWGN

Additive White Gaussian Noise (AWGN) merupakan *noise* yang terjadi dan berada pada kanal rentang spektrum frekuensi dan merupakan *noise thermal* yang sifatnya menjumlah atau *additive*. Kanal AWGN memiliki model dengan distribusi acak (*gaussian*) dengan *mean* (m) = 0 standar deviasi (σ) = 1, dan *power spectral density* (pdf) = $N_0/2$ (W/Hz) serta mempunyai rapat spektral daya yang tersebar merata pada lebar pita frekuensi tak hingga (*noise white*) (Rosita & Ansori, 2013). Model kanal AWGN dapat dimodelkan dengan fungsi matematis pada Persamaan (1) (Ramadiansyah, 2017).

$$r(t) = S_i(t) + n(t) \quad , 0 < t < T \quad (1)$$

Dimana $r(t)$ merupakan sinyal $S_i(t)$ yang telah dicampur dengan *noise* $n(t)$ dengan *noise* pada selang waktu $0 < t < T$.

2.6 Algoritma Viterbi

Algoritma viterbi berperan sebagai *decoding* dari pengkodean kanal kode konvolusi. *Decoding* merupakan proses mengembalikan bit informasi yang telah mengalami proses *encoding* menjadi bit informasi yang sesungguhnya. Algoritma viterbi menggunakan persyaratan algoritma *maximum likelihood* atau mencari kemungkinan bit yang paling mirip (Rosita & Ansori, 2013). Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *hard decision*. Pada *hard decision decoding* bekerja dengan prinsip *maximum likelihood* yaitu mencari kemungkinan dari bit yang paling mirip atau nilai *hamming distance* yang paling kecil. Nilai tersebut merupakan nilai yang digunakan untuk menentukan jalur selanjutnya pada diagram *trellis*.

2.7 Bit Error Rate (BER)

Bit Error Rate (BER) merupakan nilai yang menunjukkan jumlah terjadinya *error* tiap jumlah bit data yang terkirim. BER juga disebut dengan probabilitas munculnya *error* pada transmisi data atau *error probability*. Semakin kecil nilai dari BER maka semakin baik pula informasi yang didapatkan. Berikut persamaan untuk menghitung nilai BER (Adiati, dkk, 2017):

$$\text{BER} = (\text{Jumlah bit error}) / (\text{Jumlah bit yang dikirim}) \quad (2)$$

Sedangkan persamaan BER teori untuk kanal AWGN dengan modulasi 16 QAM sebagai berikut (Pallam, dkk, 2015):

$$\text{BER Teori} = 3/8 \operatorname{erfc}(\sqrt{(2/5 \text{ SNR})}) - 9/64 \operatorname{erfc}(\sqrt{(2/5 \text{ SNR})})^2 \quad (3)$$

2.8 Signal To Noise Ratio (SNR)

Signal to Noise Ratio (SNR) merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan seberapa banyak *noise* mengganggu sinyal yang ditransmisikan. SNR membandingkan daya sinyal yang diinginkan dengan *background noise*. Semakin besar nilai SNR semakin baik kualitas yang dihasilkan. Nilai SNR hanya dipengaruhi oleh nilai daya sinyal dan nilai daya *noise*. Berikut persamaan dari SNR (Adiati, dkk, 2017):

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log (\text{Daya sinyal rata - rata}) / (\text{Daya Noise}) \quad (4)$$

2.9 Kapasitas Kanal

Kapasitas kanal diartikan sebagai kemampuan suatu kanal atau media transmisi untuk menyalurkan informasi berdasarkan lebar pita dan SNR. Semakin besar kapasitas kanal dari suatu sistem maka semakin baik sistem tersebut. *Shannon theory* dapat digunakan untuk menghitung kapasitas kanal pada sistem *Single Input Single Output* (SISO), berikut persamaan untuk menghitung nilai kapasitas kanal (Isnawati, dkk, 2019):

$$C = \log_2 (1 + \text{SNR}) \quad \text{bps/Hz} \quad (5)$$

Dimana:

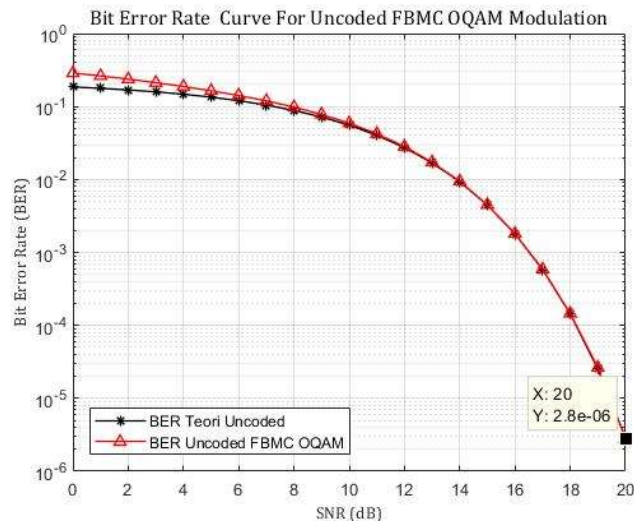
C : Kapasitas kanal.

SNR : *Signal to Noise Ratio*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sistem *Uncoded* FBMC OQAM

Simulasi sistem *uncoded* FBMC OQAM dilakukan menggunakan *software* Matlab mengikuti pemodelan sistem *uncoded* FBMC OQAM pada Gambar 1. Grafik unjuk kerja sistem FBMC OQAM *uncoded* dapat dilihat pada Gambar 6.

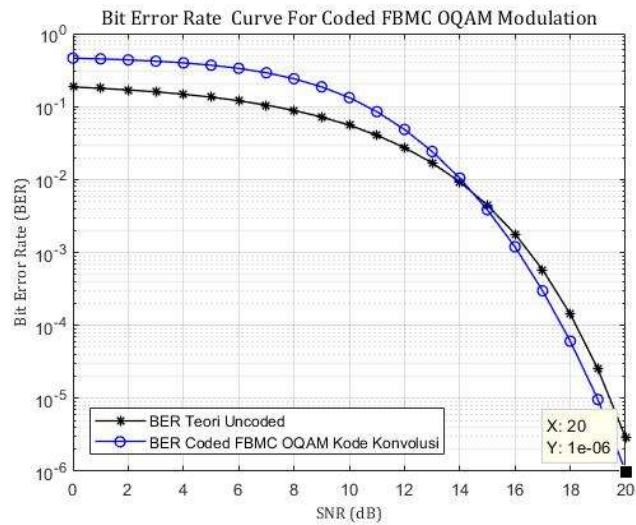


Gambar 6. Grafik Unjuk Kerja Sistem *Uncoded* FBMC OQAM

Pada Gambar 6 terlihat hasil simulasi menunjukkan ketika pada SNR 0 dB rata-rata nilai BER yang dihasilkan sebesar 0,2873. Sedangkan SNR 20 dB menghasilkan nilai BER sebesar $2,8 \times 10^{-6}$. Pada sistem *uncoded* FBMC OQAM untuk mencapai nilai BER 10^{-3} membutuhkan nilai SNR 17 dB. Nilai BER yang dihasilkan berbanding terbalik dengan nilai SNR, semakin besar nilai SNR maka akan semakin kecil nilai BER yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan nilai *noise* yang terdapat pada kanal semakin kecil apabila nilai SNR yang digunakan besar. Sedangkan jika nilai SNR yang digunakan bernilai kecil maka nilai *noise* yang terdapat pada kanal AWGN akan semakin besar dan akan menghasilkan BER yang besar pula.

3.2 Sistem *Coded* FBMC OQAM

Simulasi sistem FBMC OQAM dengan pengkodean kanal kode konvolusi dilakukan menggunakan *software* Matlab mengikuti pemodelan sistem pada Gambar 2. Grafik unjuk kerja sistem FBMC OQAM dengan kode konvolusi dapat dilihat pada Gambar 7.

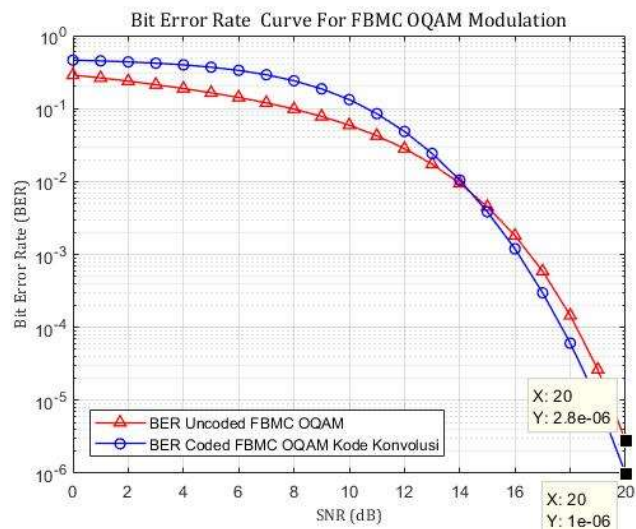


Gambar 7. Grafik Unjuk Kerja Sistem *Coded* FBMC OQAM

Pada Gambar 7 terlihat grafik unjuk kerja sistem FBMC OQAM dengan pengkodean kanal menggunakan kode konvolusi untuk mencapai nilai BER 10^{-3} membutuhkan nilai SNR sebesar 16 dB. Nilai rata-rata BER yang didapatkan pada SNR 0 dB sebesar 0,4599. Sedangkan nilai BER yang didapatkan ketika nilai SNR 20 dB sebesar $1,0 \times 10^{-6}$. Nilai BER yang dihasilkan pada sistem *coded* FBMC OQAM dengan kode konvolusi mengalami penurunan. Hal tersebut dikarenakan penggunaan pengkodean kanal kode konvolusi. Sama seperti sistem *uncoded* FBMC OQAM, pada sistem *coded* FBMC OQAM dengan kode konvolusi semakin besar nilai SNR akan semakin kecil nilai BER yang didapatkan. Hal ini dikarenakan *noise* yang ada pada kanal AWGN semakin kecil apabila nilai SNR yang digunakan besar.

3.3 Perbandingan Sistem *Uncoded* dan *Coded* FBMC OQAM

Perbandingan unjuk kerja antara sistem *uncoded* FBMC OQAM dan *coded* FBMC OQAM dengan kode konvolusi dapat ditunjukkan pada grafik perbandingan BER terhadap SNR pada Gambar 8.



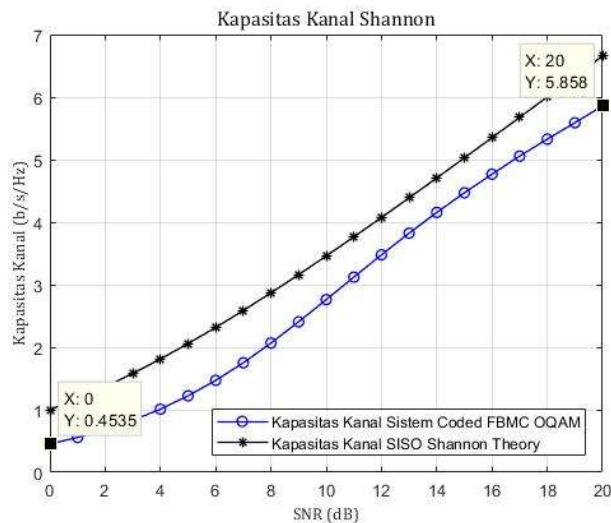
Gambar 8. Grafik Unjuk Kerja Sistem *Uncoded* dan *Coded* FBMC OQAM

Berdasarkan grafik perbandingan nilai BER terhadap SNR pada Gambar 8, untuk mencapai nilai BER 10^{-3} pada sistem *uncoded* FBMC OQAM membutuhkan nilai SNR 17 dB. Sedangkan pada sistem *coded* FBMC OQAM untuk mencapai nilai BER 10^{-3} membutuhkan nilai SNR 16 dB. Namun pada nilai SNR kecil pada sistem *coded* FBMC OQAM nilai BER lebih besar daripada sistem *uncoded* FBMC OQAM. Semakin besar nilai SNR, nilai BER yang dihasilkan pada sistem FBMC OQAM akan semakin kecil dan lebih kecil daripada sistem *uncoded* FBMC OQAM.

Pada nilai SNR 0 dB sampai SNR 14 dB nilai BER yang didapatkan pada sistem *uncoded* lebih kecil daripada sistem *coded* FBMC OQAM. Namun pada nilai SNR 15 dB sampai SNR 20 dB nilai BER yang didapatkan sistem *coded* FBMC OQAM dengan kode konvolusi lebih kecil daripada sistem *uncoded* FBMC OQAM. Dapat disimpulkan bahwa performansi dari sistem *coded* FBMC OQAM dengan kode konvolusi lebih baik daripada sistem *uncoded* FBMC OQAM pada nilai SNR tinggi. Selisih nilai BER antara sistem *uncoded* FBMC OQAM dan sistem *coded* FBMC OQAM menggunakan kode konvolusi dapat mencapai $1,8 \times 10^{-6}$ pada SNR 20 dB.

3.4 Pengujian Kapasitas Kanal

Hasil pengujian kapasitas kanal dengan jenis komunikasi SISO pada kanal AWGN ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Kapasitas Kanal

Berdasarkan Gambar 9, terlihat bahwa grafik kapasitas kanal dengan penerapan kode konvolusi pada sistem FBMC OQAM memiliki nilai 0,4535 bps/Hz pada SNR 0 dB. Sedangkan pada nilai SNR 20 dB menghasilkan kapasitas kanal sebesar 5,858 bps/Hz. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai kapasitas kanal mengalami kenaikan sebesar 5,4045 bps/Hz dari SNR 0 dB sampai SNR 20 dB. Nilai SNR berbanding lurus dengan nilai kapasitas kanal, apabila nilai SNR yang digunakan semakin besar maka nilai kapasitas kanal yang dihasilkan juga akan semakin besar.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa sistem FBMC OQAM dengan pengkodean kanal menggunakan kode konvolusi mampu menghasilkan nilai BER yang lebih baik daripada sistem FBMC OQAM tanpa kode konvolusi pada nilai SNR tinggi. Pada sistem

uncoded FBMC OQAM untuk mencapai nilai BER 10^{-3} membutuhkan nilai SNR 17 dB sedangkan pada sistem *coded* FBMC OQAM dengan kode konvolusi membutuhkan SNR 16 dB. Nilai SNR berbanding lurus dengan nilai kapasitas kanal, semakin besar nilai SNR semakin besar juga nilai kapasitas kanal yang didapatkan. Seperti pada SNR 0 dB nilai kapasitas kanal yang dihasilkan 0,4535 bps/Hz dan pada SNR 20 dB menghasilkan kapasitas kanal sebesar 5,858 bps/Hz.

DAFTAR RUJUKAN

- Adiati, R. F., Kusumawardhani, A., & Setijono, H. (2017). Analisis Parameter Signal to Noise Ratio dan Bit Error Rate dalam Backbone Komunikasi Fiber Optik Segmen Lamongan-Kebalen. *Jurnal Teknik ITS*, *6*(2).
- Elvia, D., Elvia, D., Suwadi, S., & Suryani, T. (2015). Implementasi Dan Evaluasi Kinerja Kode Konvolusi Pada Modulasi Quadrature Phase Shift Keying (QPSK) Menggunakan WARP. *Jurnal Teknik ITS*, *4*(1), A48–A52. <https://doi.org/10.12962/j23373539.v4i1.8413>
- Hendry, J., & Isnawati, A. F. (2019). Analisis Perbandingan Kinerja Ekualisasi Zero Forcing dan MMSE pada FBMC-OQAM. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, *7*(3), 600. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v7i3.600>
- Isnawati, A. F., Citra, V. O., & Hendry, J. (2019). Performance Analysis of Audio Data Transmission on FBMC-Offset QAM System. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology, IAICT 2019*, (September), 81–86. <https://doi.org/10.1109/ICIAICT.2019.8784810>
- Isnawati, A. F., & Hendry, J. (2019). Implementasi Filter Pre-Emphasis untuk Transmisi Sinyal Audio pada Sistem Komunikasi FBMC-OQAM. *Jurnal Nasional Teknik Elektro Dan Teknologi Informasi (JNTETI)*, *8*(4), 340. <https://doi.org/10.22146/jnteti.v8i4.534>
- Lynn, R., & Calvinus, Y. (2017). Kajian Dan Simulasi Prinsip Kerja Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing Untuk Sistem Transmisi Radio Over Fiber, *19*(2), 156–171.
- Mahyadi, A., & Arifin. (2011). Visualisasi Kinerja Pengkodean Menggunakan Algoritma Viterbi. *Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jurusan Teknik Telekomunikasi*, 1–5.
- Mamiek, R. R., & Moegiharto, Y. (2014). Visualisasi dan Analisa Kinerja Kode Konvolusi Pada Sistem MC-CDMA, *2*, 40–50.
- Pallam, S. W., Luka, M. K., & Aminu, M. (2015). BER Evaluation of M-QAM Modulation in Wireless Transmission Over AWGN Channel, (February).
- Prayoga, K. A. M. D., Wirastuti, N. M. A. E. D., & Hartawan, I. G. A. K. D. D. (2017). Analisis

- Unjuk Kerja Convolutional Code pada Sistem MIMO MC-DSSS Melalui Kanal Rayleigh Fading. *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 16(2), 66.
<https://doi.org/10.24843/mite.2017.v16i02p11>
- Pushpa, V., Ranganathan, H., & Palanivelan, M. (2017). BER Analysis of BPSK for Block Codes and Convolution Codes Over AWGN Channel. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 114(11), 221–230.
- Ramadiansyah, F. H. (2017). Generalized Frequency Division Multiplexing Dengan Menggunakan Offset Quadrature Amplitude.
- Rosita, E. K., & Ansori, A. (2013). Implementasi Convolutional Code dan Viterbi Decode pada DSK TMS320C6416T, 2(1).
- Utomo, F., Wirastuti, N., & Hartawan, I. (2015). Analisis Unjuk Kerja Coded Ofdm Menggunakan Kode Convolutional Pada Kanal Awgn Dan Rayleigh Fading. *Jurnal Ilmiah SPEKTRUM*, 2(2), 154–160.
- Zain, A. R., Moegiharto, Y., Politeknik, M., Negeri, E., Telekomunikasi, J. T., & Konvolusi, K. (2013). Analisa Kinerja Kode Konvolusi pada Sistem PIC (Parallel Interference Cancellation) MUD (Multiuser Detection) CDMA dengan Modulasi QAM Berbasis Perangkat Lunak, 1–7.