

**KINERJA SISTEM COFDM
(CODED ORTHOGONAL FREQUENCY DIVISION MULTIPLEXING)
PADA KANAL RADIO MOBILE**

Hendra Winata¹, Heroe Wijanto², Suyatno³

Jurusan Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknologi Telkom, Bandung

¹endrhex@yahoo.com, ²hrw@stttelkom.ac.id

Abstrak

Komunikasi data berkecepatan tinggi memerlukan teknik modulasi yang dapat mengatasi terjadinya ISI (*Inter-Symbol Interference*) dan respons frekuensi kanal yang tidak rata. OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) merupakan teknik transmisi *multicarrier* dengan periode simbol relatif lebih lebar dibandingkan nilai *delay spread* kanal. Dengan *subcarrier* spektral yang lebih sempit dari lebar-pita frekuensi koheren, OFDM diharapkan memiliki ketahanan terhadap gangguan kanal yang tidak rata. FEC (*Forward Error Correcting*) masih dibutuhkan untuk meminimumkan efek kesalahan akibat dari beberapa *subcarrier* yang mengalami *fading* lebih kuat dibandingkan lainnya. FEC dengan teknik pengkodean konvolusional dan interleaver banyak dipakai pada standar OFDM seperti *Wireless LAN 802.11a* dan *Direct Video Broadcasting*. Hasil simulasi menunjukkan pengkodean konvolusional [133 171] memberikan nilai *coding gain* maksimal 6 dB untuk modulasi *subcarrier* QPSK dan 7 dB untuk 16-QAM. Pada kanal radio mobile dengan frekuensi doppler 0, 9, 56 dan 130 Hz, diperoleh *coding gain* 7 dB. Penggunaan matriks *interleaver* 32×18 (IS-95) bekerja kurang optimal dengan perbaikan daya kurang dari 1dB. Ketika frekuensi doppler 130 Hz, matriks *interleaver* 100×96 mampu memperbaiki kinerja sistem secara signifikan, BER di sekitar 10^{-6} dicapai pada SNR = 16 dB.

Kata kunci: OFDM, *interleaver*, *delay spread*, frekuensi doppler, *coding gain*, IFFT-FFT

Abstract

High speed data communication needs modulation scheme with capability for handling ISI (*Inter-Symbol Interference*) and non-flatness of channel frequency response. OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) is a *multicarrier* transmission technique with symbol period relatively wider than *delay spread* of the channel, so that the spectral sub-carrier will be more narrow than and flat in coherent bandwidth. FEC (*Forward Error Correcting*) is still needed to minimize error due to inter-sub-carrier unflatness. FEC with convolutional coding and interleaving widely used in OFDM standards, such as *Wireless LAN 802.11a* and *Direct Video Broadcasting*, will be explored. Simulation results show convolutional coding [133 171] giving *coding gain* 6 dB maximum in QPSK *sub-carrier* modulation and 7 dB in 16-QAM. In radio mobile channel with 0, 9, 56 and 130 Hz doppler frequency, *coding gain* will be 7 dB. Interleaver matrix 32×18 (IS-95) gives less optimal result with less than 1 dB power improvement. In 130 Hz doppler frequency channel, *interleaver* matrix 100×96 will give significant system performance improvement, BER in around 10^{-6} achieved in SNR = 16 dB.

Keywords: OFDM, *interleaver*, *delay spread*, doppler frequency, *coding gain*, IFFT-FFT

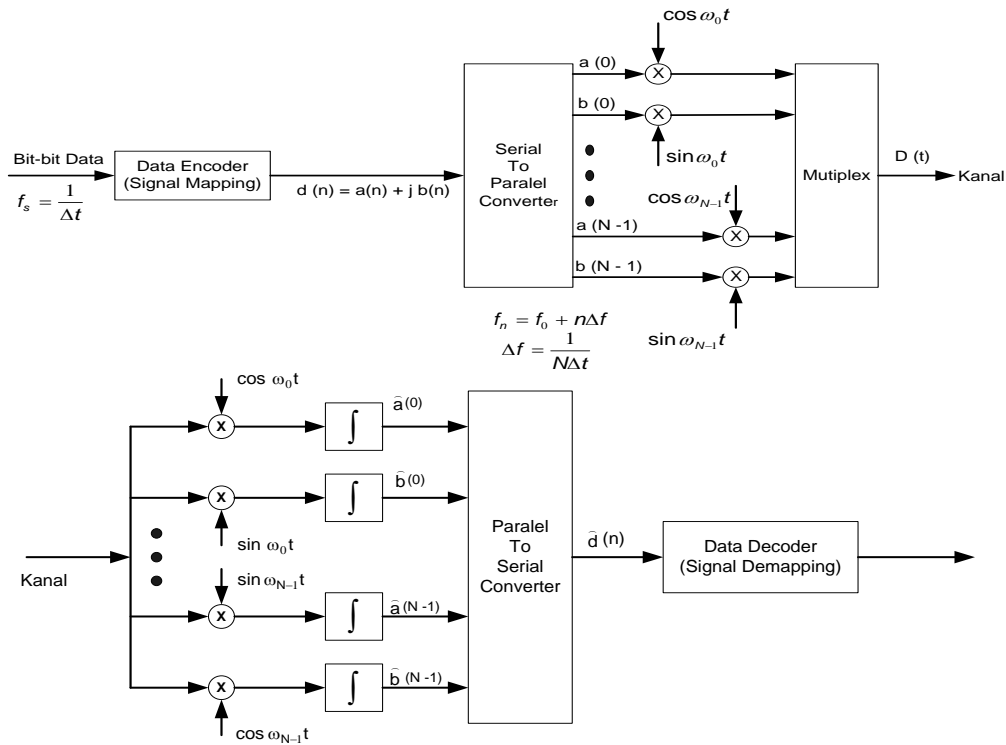
1. Pendahuluan

Kebutuhan laju data tinggi untuk layanan-layanan komunikasi bergerak telah memacu pengembangan teknik modulasi *multicarrier* OFDM untuk mengatasi terjadinya ISI (*Inter-Symbol Interference*) dan karakteristik kanal yang tidak *flat*. Teknik pengkodean kanal dibutuhkan untuk koreksi error pada beberapa *subcarrier* yang mengalami *fading* relatif kuat dibandingkan *subcarrier* lainnya.

Penelitian ini bertujuan menganalisa kinerja OFDM pada kanal radio *mobile* dengan *fading* tidak rata yang diwakili oleh kanal AWGN dan kanal *multipath frequency selective fading* terdistribusi *Rayleigh*, untuk kondisi sistem tanpa pengkodean, dengan pengkodean dan dengan sekaligus pengkodean dan *interleaver*.

2. Dasar Teori

OFDM merupakan teknik transmisi *multiplexing* dari sinyal-sinyal *multicarrier* yang mengirimkan data secara paralel pada beberapa *subcarrier* yang saling ortogonal. Spasi antar *sub-carrier* dibuat sedemikian hingga lebih sempit dari lebar-pita frekuensi koheren suatu kanal transmisi. Diharapkan jika keseluruhan lebar-pita frekuensi yang dialokasikan sangat lebar (karena laju data yang tinggi) semula akan mengalami *fading* yang tidak rata, setelah dilakukan pemecahan menjadi sejumlah *sub-carrier* termodulasi, maka masing-masing *sub-carrier* akan mengalami *fading* yang rata. Dalam domain waktu, hal ini mensyaratkan pemecahan aliran data secara paralel hendaknya dibuat dengan periode simbol yang lebih pendek dari



Gambar 1. Model Analog Sistem OFDM [1]

delay spread kanal transmisi. Model dasar pemrosesan secara analog dalam suatu sistem OFDM diperlihatkan pada Gambar 1.

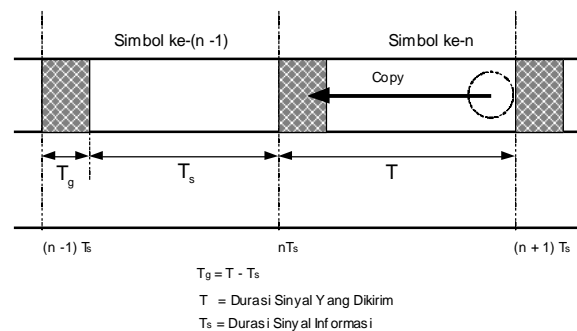
Suatu simbol OFDM *passband* dapat dinyatakan sebagai berikut [9]:

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} \exp[j2\pi(f_c - \frac{i+0.5}{T})t] & \text{untuk } t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0, & t < t_s \wedge t > t_s + T \end{cases} \quad (1)$$

Sedangkan persamaan *baseband* kompleks dinyatakan sebagai [9]:

$$s(t) = \begin{cases} \sum_{i=-\frac{N_s}{2}}^{\frac{N_s}{2}-1} d_{i+\frac{N_s}{2}} \exp[j2\pi \frac{i}{T}t] & \text{untuk } t_s \leq t \leq t_s + T \\ 0, & t < t_s \wedge t > t_s + T \end{cases} \quad (2)$$

Guard interval antar-simbol dibutuhkan untuk menghilangkan ISI secara penuh. Diambil dari *copy* sinyal periode akhir simbol OFDM dan ditempatkan di depan simbol. Besar nilai *guard interval* terhadap periode simbol OFDM bergantung pada kebutuhan, biasanya bernilai 25% dari periode simbol OFDM, asalkan nilai tersebut harus lebih lebar dari *delay spread* kanal. Prinsip pembangkitan *guard interval* diperlihatkan pada Gambar 2.



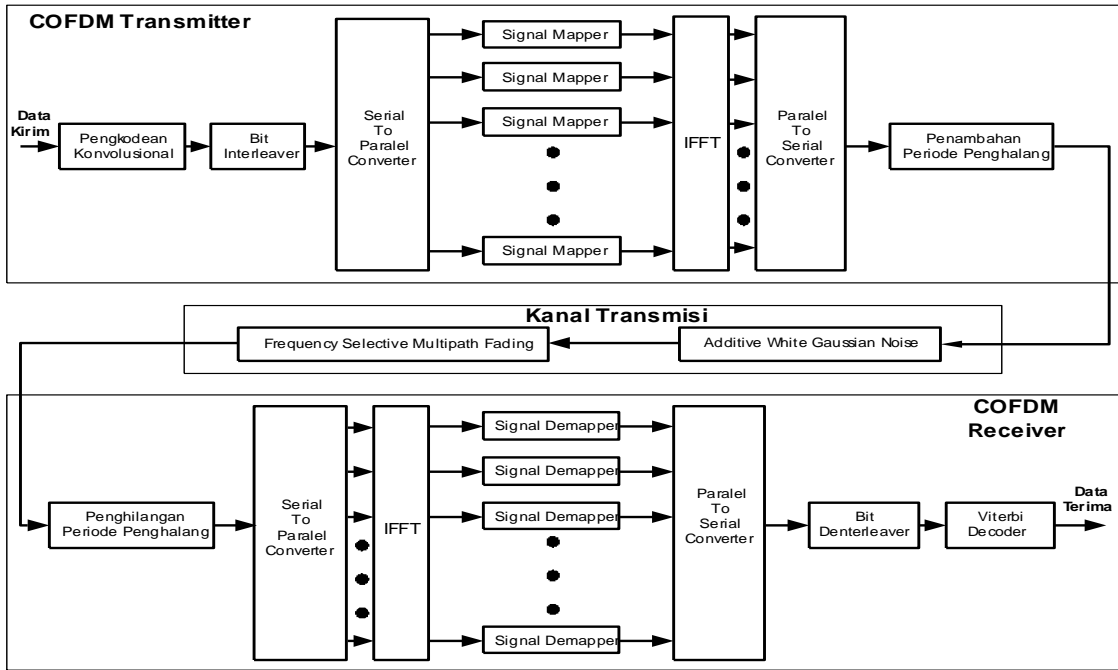
Gambar 2. Prinsip Pembangkitan *Guard Interval*

Dengan penambahan FEC (*Forward Error Correcting*) pada sistem OFDM, efek kesalahan akibat terjadinya *fading* tak rata antar-*subcarrier* dapat diminimumkan, sehingga kemudian disebut COFDM. Pada penelitian ini akan digunakan FEC dengan teknik pengkodean konvolusional dan *interleaving* yang telah banyak dipakai pada standar OFDM seperti Wireless LAN 802.11a dan Direct Video Broadcasting.

Operasi matematis *encoding* pada kode konvolusional dapat dinyatakan sebagai [4]:

$$v = u * G \quad (3)$$

dengan v deretan bit keluaran *encoder*, u deretan bit masukan *encoder*, dan G menyatakan respon impuls *encoder*. Teknik *decoding* yang digunakan adalah *decoding* Viterbi yang berdasarkan prinsip *maximum likelihood*. Ada dua macam cara pengambilan keputusan dalam implementasi *maximum likelihood* yaitu *hard decision* dan *soft decision*. Pada



Gambar 3. Model Sistem COFDM Ekuivalen *Lowpass*

penelitian ini digunakan metode *decoding* Viterbi *hard decision*.

Kinerja pengkodean konvolusional dibatasi oleh *coding gain* yang dinyatakan sebagai [8]:

$$Coding\ gain \leq 10 \log (rd_f) \quad (4)$$

dengan r menyatakan laju kode dan d_f menyatakan *free distance* kode konvolusional. Nilai *coding gain* tersebut juga terkait dengan terbatasnya kemampuan pengkodean dalam mengoreksi kesalahan (*error correcting capability*).

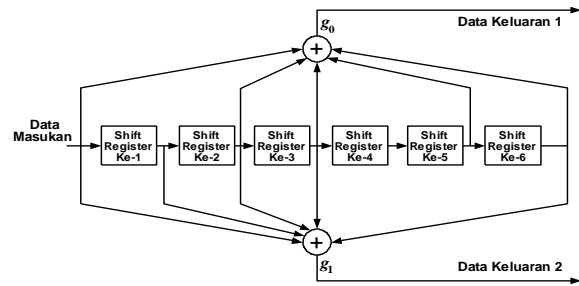
Interleaver diperlukan untuk menyebarkan pola kesalahan bit berurutan (*bursty*) yang diakibatkan oleh kanal *fading*, sehingga keterbatasan kemampuan koreksi kesalahan oleh pengkodean konvelusional dapat diatasi. Algoritma *interleaving* adalah menempatkan bit-bit pada kolom-kolom dan dibaca per baris, sedangkan *deinterleaving* melakukan hal sebaliknya. Semakin besar ukuran matriks *interleaving*, semakin besar pula penyebaran kesalahan dapat dilakukan, namun juga akan diperlukan peningkatan ukuran memory dan volume proses, sehingga *latency*-nya meningkat pula.

3. Model Simulasi

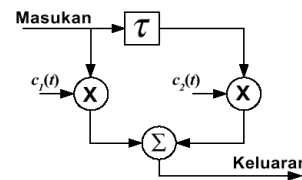
Untuk memudahkan implementasi, pada proses pembangkitan sinyal di pengirim COFDM dapat digunakan IFFT (*Invers Fast Fourier Transform*), sedangkan pada proses ekstraksi sinyal di penerima COFDM digunakan FFT (*Fast Fourier Transform*). Model simulasi sistem COFDM ekuivalen *lowpass* yang dipergunakan dalam penelitian ini dijelaskan pada Gambar 3.

Struktur *encoder* konvolusional yang digunakan untuk FEC pada model tersebut adalah

berdasarkan polinomial oktal standar [133 171] dengan *constraint length* 7 dan laju kode $\frac{1}{2}$ sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4. Selain itu, digunakan 2 macam *bit interleaver*, yaitu yang digunakan pada standar IS-95 dengan matriks 32×18 dan matriks optimasi 100×96 .



Gambar 4. Struktur *Encoder* Konvolusi [133 171]



Gambar 5. Model *2-ray Rayleigh Fading*

Model kanal *multipath Rayleigh fading* menggunakan model *2-ray Rayleigh fading*, yaitu model *tapped delay line* dengan 2 *tap*. Pembangkitan koefisien tap diambil dari fungsi *scattering* yang dinyatakan sebagai [2]:

$$h(\tau, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \exp(j(\theta_n + 2\pi f_{D_n} \tau)) \cdot \delta(\tau - \tau_n) \quad (6)$$

Tabel 1. Parameter Simulasi Sistem COFDM Pada Kanal *Multipath Rayleigh Fading*

Parameter-Parameter Dasar			
Laju data		400 kbps	
Durasi simbol OFDM		120 μ s	
Durasi efektif simbol OFDM		100 μ s	
Jumlah bit persimbol OFDM		48 bit	
Durasi <i>Guard interval</i>		20 μ s	
Frekuensi kerja		2 GHz	
Modulasi		QPSK	
Dengan Pengkodean		Tanpa Pengkodean	
Jumlah carrier	48	Jumlah carrier	24
Jumlah point FFT	64	Jumlah point FFT	32
<i>Subcarrier spacing</i>	10 kHz	<i>Subcarrier spacing</i>	10 kHz
<i>Bandwidth</i>	480 kHz	<i>Bandwidth</i>	240 kHz
<i>Sampling interval</i>	1,5625 μ s	<i>Sampling interval</i>	3,125 μ s
Parameter Pengkodean			
Laju kode		1/2	
Struktur Encoder		[133 171]	
Decoder		Hard Decision Viterbi	
Parameter Interleaver			
Matriks IS - 95		32 \times 18	
Matriks optimasi		100 \times 96	
Parameter Kanal			
<i>Delay Spread</i>		12,5 μ s	
Frekuensi Doppler		0, 9, 56, 130 Hz	
<i>Bandwidth Koheren</i>		80 kHz	
Karakteristik Kanal		frekuensi selektif <i>time-variant</i> serta <i>slow fading</i> dengan distribusi <i>Rayleigh</i>	

Simulasi sistem COFDM pada kanal AWGN dilakukan pada parameter-parameter kondisi berikut:

- 1) Jumlah *sub-carrier*: 16, 32, 64, 128, 256, 512 dan 1024.
- 2) Kode konvolusional menggunakan dengan polinomial oktal [133 171] laju pengkodean $\frac{1}{2}$.
- 3) Matriks *interleaver*: 32 \times 18 (standar IS-95).

Adapun untuk kanal *multipath Rayleigh fading*, simulasi sistem COFDM dilakukan pada parameter-parameter kondisi yang dirincikan dalam Tabel 1.

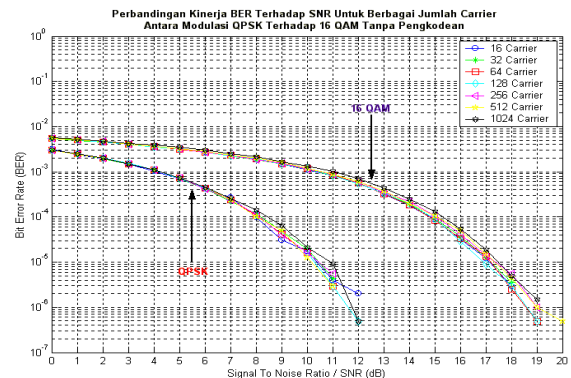
4. Hasil Simulasi dan Analisa

Pada kanal AWGN, sistem OFDM tanpa pengkodean memiliki kecenderungan kinerja yang sama untuk keseluruhan jumlah *subcarrier*. Perbedaan kinerja hanya dipengaruhi oleh perbedaan skema modulasi *subcarrier* QPSK dan 16-QAM yang dipergunakan, sebagaimana diperlihatkan oleh Gambar 6. Sedangkan penggunaan pengkodean dalam sistem OFDM pada kanal AWGN, untuk setiap jumlah *subcarrier* pada masing-masing skema modulasi *subcarrier*, memberikan nilai-nilai *coding gain* maksimum seperti terlihat di Tabel 2. Pada kanal *multipath Rayleigh fading* dengan perubahan frekuensi *doppler* 0, 9, 56 dan 130 Hz, kinerja sistem OFDM dengan modulasi QPSK dari hasil simulasi dengan pengkodean dan tanpa pengkodean dapat diperlihatkan pada Gambar 7. Semakin tinggi frekuensi *doppler*, kinerja sistem

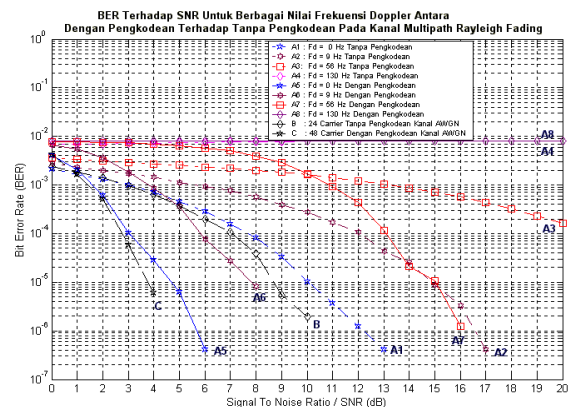
OFDM menurun karena menguatnya *fading* dan pergeseran frekuensi yang berakibat pada terjadinya ICI (*inter carrier interference*).

Table 2. *Coding gain* untuk keseluruhan jumlah *subcarrier* pada kanal AWGN

Jenis Modulasi	<i>Coding gain</i> maksimum (dB)						
	Jumlah <i>subcarrier</i>						
	16	32	64	128	256	512	1024
QPSK	5	6	5	5	5	5	6
16 QAM	7	6	5	5	6	7	6



Gambar 6. Kinerja Sistem OFDM di Kanal AWGN

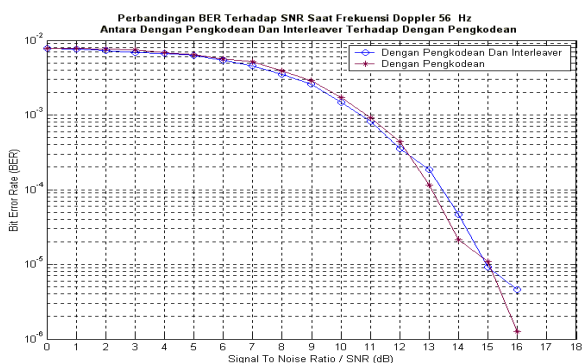


Gambar 7. Kinerja Sistem OFDM dengan Pengkodean dan Tanpa Pengkodean pada Kanal *Multipath Rayleigh Fading*

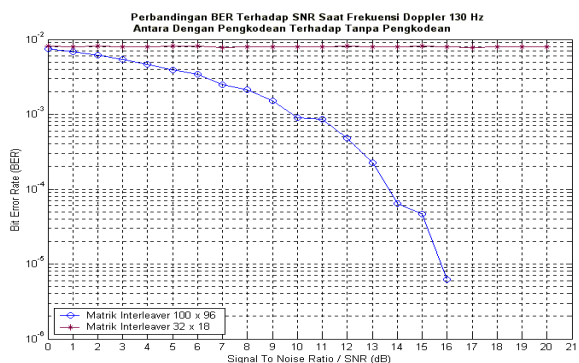
Gambar 8 memperlihatkan kinerja sistem OFDM untuk jumlah *subcarrier* 32 dengan modulasi QPSK pada kanal *multipath Rayleigh fading* dengan perubahan frekuensi *doppler* 56 Hz. Perbaikan kinerja oleh *interleaving* 32 \times 18 kurang signifikan, yakni diperoleh perbaikan daya kurang dari 1dB. Hal ini disebabkan oleh terlalu kecilnya ukuran matriks, sehingga tidak memiliki kedalaman yang cukup untuk mendistribusikan pola kesalahan berurutan (*bursty*) oleh kanal *fading*. Kurang efektifnya ukuran matriks *interleaving* 32 \times 18 ternyata tidak cukup terkompensasi oleh perbaikan kinerja dari pengkodean konvolusi [133 171] yang hanya memiliki *constraint length* 7.

Kondisi terburuk terjadi pada kanal *multipath fading* dengan frekuensi *doppler* 130 Hz, jika

digunakan pengkodean dan *interleaver* matriks 32×18 yang tidak mampu lagi mengatasi degradasi kinerja sistem COFDM karena dominasi *error burst* akibat kanal *fading*. Kode konvolusional [133 171] yang hanya memiliki *constraint length* 7 tidak lagi dapat mengompensasi terlalu kecilnya ukuran matriks *interleaving*. Pada Gambar 9 diperlihatkan penggunaan matriks *interleaver* 100×96 pada kanal *multipath* dengan frekuensi *doppler* 130 Hz telah mampu meningkatkan kinerja sistem secara signifikan. Nilai BER di sekitar 10^{-6} dicapai pada SNR 16 dB. Artinya, matriks *interleaver* 100×96 memiliki kedalaman memadai untuk mendistribusikan kesalahan berurutan (*bursty*) oleh kanal *fading*.



Gambar 8. Kinerja Sistem OFDM-QPSK dengan *Interleaving* 32×18 dan *Subcarrier* 32 pada Kanal *Multipath Rayleigh Fading*



Gambar 9. Perbandingan Kinerja Sistem OFDM dengan *Interleaving* 100×96 dan 32×18 pada Kanal *Multipath Rayleigh Fading*

5. Kesimpulan dan Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan perubahan jumlah *subcarrier* tidak mempengaruhi kinerja OFDM pada kanal AWGN untuk masing-masing penggunaan modulasi QPSK dan 16-QAM. *Coding gain* maksimal pada kanal AWGN untuk modulasi QSPK berkisar 5 – 6 dB dan untuk modulasi 16-QAM berkisar 5 – 7 dB. Semakin tingginya frekuensi *doppler* pada kanal *multipath Rayleigh fading* menyebabkan kinerja sistem memburuk akibat semakin parahnya ketakrataan *fading* antar-*subcarrier* dan pergeseran frekuensi *doppler* menyebabkan inter-carrier interference.

Matriks *interleaving* 32×18 kurang efektif dalam memperbaiki degradasi kinerja sistem COFDM, karena tidak memiliki ukuran kedalaman yang cukup untuk mendistribusikan pola kesalahan berurutan (*bursty*) pada kanal *multipath Rayleigh fading* dan tidak mendapatkan kompensasi perbaikan yang memadai dari koreksi kesalahan oleh pengkodean konvolusi [133 171]. Pada kondisi *fading* terburuk dengan frekuensi *doppler* 130 Hz, ketika pengkodean dan matriks *interleaving* 32×18 tidak memberikan perbaikan kinerja sistem, matriks *interleaving* 100×96 dapat memberikan perbaikan yang signifikan dengan BER di sekitar 10^{-6} yang dapat dicapai pada SNR 16 dB.

Hal-hal yang dapat diteliti lebih lanjut, antara lain analisis penggunaan *decoder Viterbi soft decision* dan *carrier interleaving*. COFDM juga dapat dikembangkan untuk model MC-CDMA berbasis OFDM. Teknik pembentukan sinyal ortogonalnya dapat dikembangkan dari transformasi *wavelet* yang fungsi basisnya juga ortogonal.

Daftar Pustaka:

- [1] Bello, P. A., *Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channel*, IEEE Trans., On Communication System, Vol. CS-11, pp. 360-393, Desember 1963.
- [2] Cimini, L. J. Jr., *Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, IEEE Trans., On Comm, Vol. 33, pp. 665-675, July 1985.
- [3] Hoehner, P., A. Steingar, *Modelling and Emulation of Multipath Fading Channels Using 'Controlled Randomness'*, Institute for Communications Technology. German.
- [4] Kim, Y. H., L. Song, H. G. Kim, T. Chang, H. M. Kim., *Performance Analysis of Coded OFDM System in Time-Varying Multipath Rayleigh Fading Channels*, IEEE Trans., On Vehicular Technology, Vol 48, pp. 1610-1615, September 1999.
- [5] Lin, S., D. J. Costello Jr., 1983, *Error Correcting Codes*, New Jersey: Prentice-Hall.
- [6] Nee, V. R., R. Prasad, 2000, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Boston: Artech House.
- [7] Oppenheim, A., V. Schaffer, W. Ronald, 1989, *Discrete-Time Signal Processing*, New Jersey: Prentice Hall.
- [8] Proakis, J. G., 1995, *Digital Communications*. New York: McGraw-Hill.
- [9] Soliman, S. S., M. D. Srinath, 1990, *Continuous and Discrete Signals and Systems*, New Jersey: Prentice-Hall.
- [10] William, Y. Z., Y. Wu, *COFDM: an Overview*. IEEE Transactions On Broadcasting, Vol. 41, March 1995.