

# KINERJA AKSES JAMAK OFDM-CDMA

Sukiswo<sup>1</sup>, Ajub Ajulian Zahra<sup>2</sup>

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,  
Jln. Prof. Sudharto, SH, Tembalang, Semarang, 50275  
E-mail: <sup>1</sup>sukiswok@yahoo.com, <sup>2</sup>ayub.ayulian@gmail.com

**Abstract.** Problems in the current telecommunications system is how to send data with a very high speed but limited in the frequency allocation. One of the solution of this problems that is used a OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) system which is a multicarrier communication scheme where the inter-frequency subcarriers orthogonal to each other and overlapping each other so it can save the frequency allocation. To serve more than one user, OFDM systems have combined with a CDMA multiple access technique.

A simulation of the OFDM system created using Matlab by applying the CDMA system for the multiple access technique in the OFDM system and known as CDMA-OFDM. Combination of these two techniques will increase the speed of data transmission and it can serve many users at one time. This final project aims to determine the influence of the number of users in the system, the long PN code, the number of subcarrier and the value of  $E_b/N_0$  CDMA-OFDM system in Additive White Gaussian Noise (AWGN) transmission channel. The performance of the system was known from the value of Bit Error Rate (BER) at receiver.

For PN code length variation 32, 64 and 128, the simulation CDMA-OFDM system with 32 users showed that the longer PN code is used, the system will show a better performance. It can be seen from the value of the BER system is decreases. For PN code length 32, the system will show the value of BER 0 in the level of  $E_b/N_0$  9 dB. For PN code length 64, the system will show the value of BER 0 in the level of  $E_b/N_0$  7 dB and for PN code length 128, the system will show the value of BER 0 in the level of  $E_b/N_0$  3 dB.

**Keywords:** CDMA, OFDM, PN code, subcarrier, multiuser.

*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) merupakan salah satu teknologi yang akan memecahkan masalah keterbatasan frekuensi yang terjadi saat ini. OFDM merupakan pengembangan dari teknologi *Frekuensi Division Multiplexing* (FDM) dan termasuk dalam teknologi *Multicarrier*, dimana informasi yang panjang dipecah menjadi paket-paket kecil kemudian dikirimkan secara bersamaan.

Selain digunakan untuk *multiplexing*, teknik OFDM juga dapat digunakan untuk akses jamak. Untuk melayani lebih dari satu pengguna, teknik OFDM harus dikombinasi dengan teknik akses jamak seperti CDMA. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis dari sistem akses jamak pada *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) menggunakan teknik akses jamak *Code Division Multiple Access* (CDMA) sehingga diperoleh data yang dapat mengetahui kinerja dari sistem tersebut.

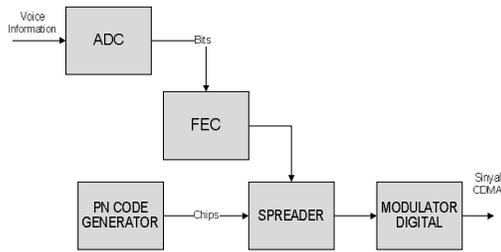
Pada makalah ini ditampilkan hasil simu-

lasi dan analisis pengaruh jumlah *chip* kode PN, jumlah pengguna, dan tingkat  $E_b/N_0$  pada kanal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) terhadap nilai BER pada sistem CDMA-OFDM.

Parameter yang digunakan antara sinyal masukan digital acak, kode *pseudonoise* (PN) tipe Walsh, jumlah *chip* kode PN maksimal 128 *chip*. Simulasi sistem dilakukan untuk kondisi *forward link* dengan modulasi digital tipe BPSK.

## SISTEM CDMA

CDMA adalah teknik modulasi dan akses jamak berdasarkan teknik *spread spectrum direct sequence* dimana pengiriman sinyal menduduki lebar pita frekuensi melebihi spektrum minimal yang dibutuhkan. Teknik spektrum tersebar pada awalnya digunakan untuk kebutuhan militer karena memiliki kelebihan mampu mengatasi *jamming* dengan baik.

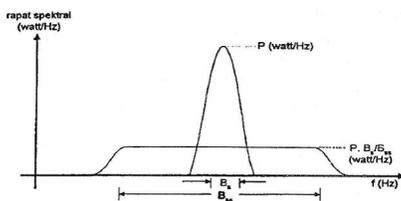


**Gambar 1. Blok diagram sistem CDMA.**

Pada teknik akses jamak CDMA, informasi suara yang berupa sinyal analog akan diubah menjadi sinyal digital oleh *Analog Digital Converter* (ADC). Sinyal digital ini akan diproses oleh blok *Forward Error Correction* (FEC) sebelum dilakukan proses penyebaran. Generator kode PN akan membangkitkan kode PN yang digunakan untuk proses penyebaran. Data yang telah disebar akan dimodulasi dengan modulasi *Phase Shift Keying* (PSK) atau *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

**Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**

*Direct sequence* merupakan suatu teknik spektrum tersebar dimana pita frekuensi diperlebar dengan cara menambah kecepatan bit data. Hal ini dilakukan dengan mengalikan tiap-tiap bit data dengan sejumlah sub bit yang dinamai *chips*. Jika diasumsikan ada 10 bit *chips*, maka tiap bit dari sinyal asli akan dikalikan dengan 10 bit *chips*. Hasil dari proses ini akan meningkatkan kecepatan 10 kali lipat data asli, dengan meningkatnya kecepatan data ini maka pita frekuensi akan meningkat 10 kali lipat juga.



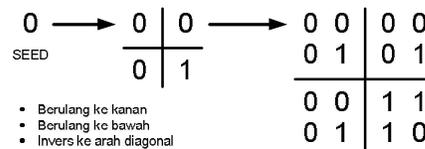
**Gambar 2 Spektrum sinyal DSSS.**

Dari Gambar 2 terlihat bahwa transmisi spektrum tersebar menduduki pita frekuensi yang lebar mengakibatkan rapat spektral daya yang rendah bahkan dibawah level derau. Sehingga sistem ini memiliki keunggulan dalam mengatasi derau. Terlihat juga bahwa spektrum sinyal DSSS memiliki pita frekuensi yang jauh lebih lebar dari pada sinyal informasi. Ada dua ciri

sistem spektrum tersebar, a.) pengiriman sinyal memakai lebar pita frekuensi yang sangat lebar. b.) pengkodean menggunakan deretan bit acak (kode PN).

**Kode Walsh**

Kode Walsh merupakan kode orthogonal yang dipergunakan untuk memisahkan kanal-kanal untuk sistem CDMA. Kode Walsh digunakan pada *forward link* untuk memisahkan trafik pengguna satu dengan yang lain. Kode Walsh juga digunakan pada *reverse link* untuk memisahkan banyaknya kanal kode yang dikirimkan agar dapat diterima pada satu pelanggan.



**Gambar 3. Pembentukan matriks kode Walsh.**

Gambaran sederhana pembangkitan urutan *orthogonal* kode Walsh adalah sebagai berikut, misalkan ada sebuah bit 0, lalu bit 0 tersebut diulang secara vertikal dan horisontal, dan pada bagian kanan bawah bit-bit kode Walsh di-*inverse*-kan. Proses ini dapat berulang dengan dihasilkannya blok-blok kode yang baru sampai kode yang diinginkan dengan jumlah *chip* yang sesuai dihasilkan. Urutan kode dengan cara inilah yang dinamakan kode Walsh.

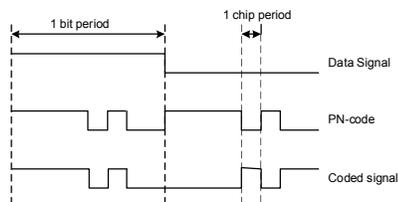
**Teknik Spektrum Tersebar pada Sistem CDMA**

Urutan kode *Pseudorandom Noise* (PN) digunakan pada *forward link* dan *reverse link*. Pada CDMA2000, urutan *Pseudorandom Noise* digunakan untuk mengidentifikasi transmisi yang spesifik dari suatu sektor *Radio Base Station* (RBS) pada *forward link* dan juga digunakan oleh RBS untuk memisahkan terminal-terminal pelanggan yang berbeda satu dengan yang lain pada *reverse link*.

Sinyal informasi dikalikan dengan kode *Pseudorandom Noise*. Kode PN adalah rangkaian bit dengan kecepatan tinggi yang bernilai polar dari (+1) ke (-1) atau non polar 1 ke 0. Pemakaian sejumlah *chip* kode ini dimaksudkan untuk mendapatkan sinyal-sinyal asli dalam bit-bit kecil kode PN. Hal ini

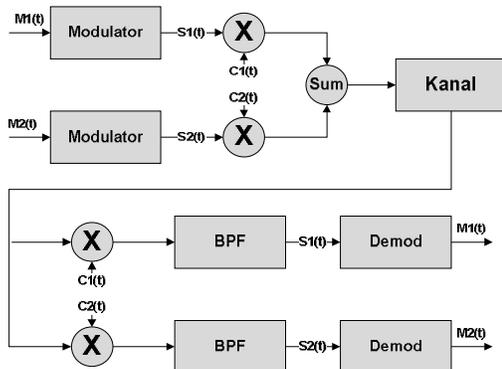
dilakukan dengan mengalikan sinyal asli termodulasi dengan kode PN berkecepatan tinggi yang akan membagi sinyal menjadi bit-bit kecil, oleh karena itu lebar pita frekuensi menjadi bertambah.

Proses di atas ditunjukkan pada Gambar 4 jumlah kode *chip* yang dipakai untuk melebarkan pita frekuensi berbanding lurus dengan jumlah *chip* yang digunakan.



Gambar 4. Tampilan bit data dan kode PN.

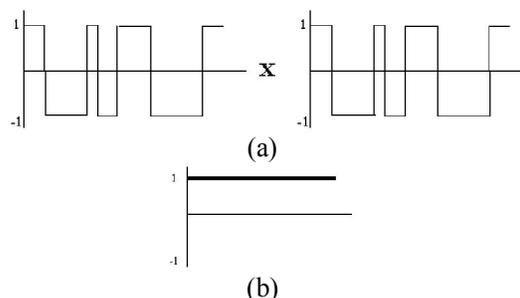
Pada Gambar 5 diasumsikan ada dua pemancar yang mentransmisikan dua pesan berbeda, dianggap bahwa masing-masing pemancar merupakan telephone genggam yang terpisah. Pesan  $M_1(t)$  dan  $M_2(t)$  sebagai fungsi waktu dimodulasikan dengan sinyal pembawa berfrekuensi tinggi. Pada sistem spektrum tersebar, sinyal pembawa yang dipakai untuk memodulasi mempunyai frekuensi yang sama. Keluaran dari modulator ini berupa sinyal  $S_1$  dan  $S_2$ . Setelah modulator, sinyal tersebut dikalikan dengan kode PN-nya masing-masing,  $C_1$  dan  $C_2$ . Dalam contoh ini dipakai kode PN yang bernilai -1 dan 1. Setelah disebar dalam pita frekuensi, masing-masing sinyal ditransmisikan. Karena banyak sinyal ditransmisikan dari pemancar yang berbeda dalam waktu yang bersamaan, proses transmisi ini diwujudkan dengan penjumlahan spektrum secara sederhana.



Gambar 5. Diagram blok pemancar dan penerima sistem CDMA.

Pada bagian penerima, sinyal yang diterima akan berupa sinyal spektrum tersebar. Untuk mendapatkan kembali masing-masing pesan dalam sinyal tersebut maka dilakukan perkalian terhadap sinyal penerimaan tersebut dengan kode PN yang sesuai. Karena telah dipilih kode PN dalam rentangan -1 dan 1, teknik perkalian kode PN ini akan bekerja dengan sempurna. Karena sinyal asli pada pemancar telah dikalikan dengan kode PN, dan kembali dikalikan dengan kode PN yang sama pada penerima, maka kode PN yang lain dapat dihilangkan dari pesan yang diterima. Gambar 6 mengilustrasikan bagaimana kode PN dieliminasi.

Dengan mengeliminasi kode PN maka akan didapatkan pesan yang diinginkan dari sinyal spektrum tersebar tersebut. Rangkaian penerima yang melakukan hal ini disebut *correlator*. *Correlator* akan menurunkan kembali sinyal spektrum tersebar menjadi sinyal asli dengan pita sempit yang berpusat pada frekuensi pembawa pemodulasi. Sinyal hasil proses ini kemudian dilewatkan pada *band pass filter* (BPF) pada frekuensi pembawa. Operasi ini dimaksudkan untuk mendapat kembali sinyal yang diinginkan dan menolak semua sinyal selain frekuensi sinyal yang diinginkan. Akhirnya sinyal akan didemodulasi untuk menghilangkan frekuensi carrier.

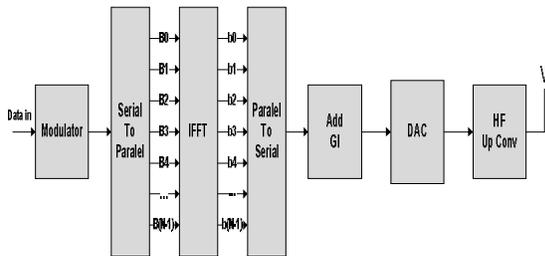


Gambar 6. Eliminasi kode PN.  
(a) Autokorelasi dua kode PN.  
(b) Sinyal pesan hasil autokorelasi.

### Pemancar OFDM

Pemancar dalam sistem OFDM terdiri dari masukan, pemetaan, pengubah serial-paralel, *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), dan pengubah *parallel to serial*. Data masukan yang berupa data serial akan dimodulasi menggunakan teknik modulasi seperti M-PSK atau M-QAM. Data yang telah dimodulasi kemudian diubah ke

dalam bentuk paralel pada blok *serial to paralel* dengan menghasilkan simbol-simbol secara paralel.



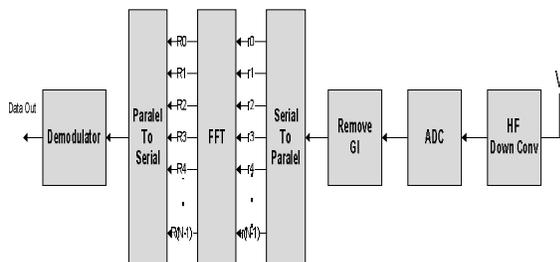
Gambar 7. Diagram pemancar OFDM.

Simbol-simbol yang telah dalam bentuk paralel tersebut akan dilewatkan ke blok IFFT untuk menghasilkan simbol-simbol OFDM yang saling *orthogonal* satu sama lain. Operasi IFFT dilakukan pada setiap satuan simbol, yang akan memberikan cuplikan dalam kawasan waktu kompleks.

Kemudian simbol-simbol OFDM yang masih dalam bentuk paralel akan diubah kembali menjadi bentuk serial pada blok *paralel to serial*. Sinyal tersebut akan diberi tambahan *guard interval* yang untuk mengurangi terjadinya *Intersymbol Interference* (ISI). Sinyal tersebut selanjutnya akan dikonversi menjadi *high frequency* (HF) sebelum ditransmisikan ke kanal.

### Penerima OFDM

Proses yang terjadi pada penerima adalah kebalikan dari proses yang dilakukan pada pemancar. Penerima akan membawa sinyal terima yang telah melalui kanal untuk dirubah kembali menjadi sinyal *baseband* melewati sinyal pada blok *down converter* HF. Dari sinyal *baseband* yang dihasilkan kemudian dilakukan proses pelepasan *guard interval* sebelum diubah menjadi bentuk paralel.

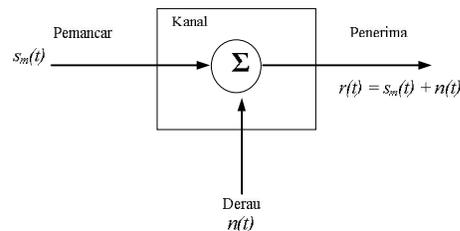


Gambar 8. Blok diagram penerima OFDM.

FFT merupakan komponen yang paling utama pada bagian perencanaan demodulasi. Ketika lebih dari satu pembawa dimasukkan, FFT merupakan suatu metode praktis untuk memperbaiki data dari pembawa (*carrier*). FFT digunakan untuk merubah kembali ke ranah frekuensi.

Sampel dari daerah waktu dimasukkan ke dalam FFT, hal ini diperlukan untuk menyaring amplitudo dan fase dari sinyal tersebut. Penyaringan amplitudo dan fase tergantung dari pewaktuan simbol  $x+iy$  yang dibutuhkan. Sinyal yang telah melalui blok FFT tersebut akan dirubah kembali ke bentuk serial untuk selanjutnya dilakukan proses demodulasi agar didapatkan data seperti data masukan pada pemancar.

### Kanal AWGN



Gambar 9. Pemodelan kanal AWGN

Dalam komunikasi, kanal *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) adalah suatu kanal dimana informasi diberi gangguan berupa penambahan linear dari *white noise* dengan kerapatan spektrum yang konstan dan distribusi *Gaussian* dari *sample noise*.

### Parameter Eb/No

$E_b/N_0$  (*energy per bit to noise power spectral density ratio*) adalah parameter yang biasa digunakan dalam komunikasi digital. Hal ini sangat berguna saat membandingkan performa *bit error rate* (BER) untuk modulasi digital yang berbeda-beda tanpa menyertakan parameter pita frekuensi. Parameter lain yang sering digunakan adalah  $E_s/N_0$  (*energy per symbol to noise power spectral density ratio*).

### Processing Gain

*Processing Gain* dari spektrum tersebar didefinisikan sebagai perbedaan kinerja antara sistem yang menggunakan spektrum tersebar dengan sistem yang tidak menggunakan spektrum tersebar. *Processing Gain* pada sistem CDMA

menentukan unjuk kerja dari sistem. Pendekatan yang sering digunakan untuk menyatakan *processing gain* adalah perbandingan antara lebar pita frekuensi spektrum tersebar dengan laju bit informasi (data).

### Bit Error Rate (BER)

Dalam telekomunikasi, rasio *error* adalah rasio jumlah bit, elemen, karakter, atau blok yang diterima dengan salah dibanding jumlah total bit, elemen, karakter, ataupun blok yang dikirim sepanjang interval waktu tertentu. Rasio yang paling sering ditemui adalah *bit error ratio* (BER). Contoh BER adalah jumlah kesalahan bit yang diterima dibagi dengan jumlah total bit yang dikirimkan. Biasanya kurva BER digambarkan dalam hubungan BER (dB) dengan SNR (dB) atau BER (dB) dengan  $E_b/N_0$  (dB).

### PROGRAM SIMULASI

Program ini mensimulasikan tentang bagaimana pengaruh dari banyaknya pengguna dalam sistem, jumlah *chip* kode PN, tingkat  $E_b/N_0$  dengan modulasi BPSK pada kinerja sistem CDMA-OFDM pada kanal AWGN. Masukan dalam sistem ini berupa data acak digital yang telah ditentukan jumlahnya yaitu 1024 bit. Data-data tersebut kemudian dimodulasi BPSK, disebar dengan kode PN yang dapat divariasikan, dimodulasi OFDM dengan *subcarrier* tertentu dan ditransmisikan oleh pemancar CDMA-OFDM. Sinyal informasi dilewatkan kanal AWGN dan pada akhirnya diterima oleh penerima CDMA-OFDM untuk mendapatkan kembali data informasi. Pada penerima jumlah bit yang salah akan dibandingkan dengan jumlah bit yang ditransmisikan sehingga diperoleh nilai BER.

Pada pengujian akan dilakukan variasi terhadap jumlah *chip* kode PN yang digunakan dan banyaknya pengguna dalam sistem untuk kemudian dianalisis. Kinerja sistem pada simulasi ini dilihat berdasarkan nilai *bit error rate* (BER) pada beberapa nilai  $E_b/N_0$  kanal yang digunakan.

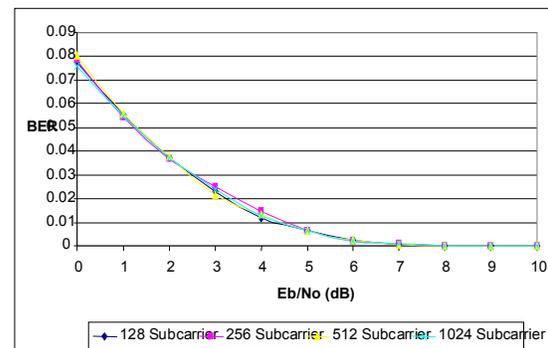
### PENGUJIAN DAN ANALISIS

#### Pengaruh $E_b/N_0$ dan Jumlah *Sub-carrier* Terhadap BER Sistem CDMA-OFDM.

Pengujian pertama pada sistem CDMA-OFDM untuk mengetahui unjuk kerja sistem

dengan mengubah parameter  $E_b/N_0$  pada kanal AWGN. Dimana parameter jumlah pengguna dan jumlah *chip* kode PN tetap. Selain parameter  $E_b/N_0$ , parameter lain yang dapat diubah adalah jumlah *subcarrier*.

Untuk melihat pengaruh dari jumlah *subcarrier* terhadap kinerja sistem CDMA-OFDM akan dibandingkan BER sistem antara jumlah *subcarrier* yang berbeda-beda yaitu sistem dengan 128 *subcarrier*, 256 *subcarrier*, 512 *subcarrier*, dan 1024 *subcarrier*. Perbandingan BER sistem CDMA-OFDM dengan berbagai jumlah *subcarrier* pada nilai  $E_b/N_0$  0 hingga 10 dapat dilihat pada Gambar 10.



**Gambar 10. Grafik perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  sistem CDMA-OFDM dengan 128, 256, 512, dan 1024 *subcarrier*.**

Simulasi sistem menggunakan jumlah *subcarrier* yang berbeda-beda yaitu 128, 256, 512 dan 1024 *subcarrier* digunakan untuk melihat unjuk kerja dari sistem CDMA-OFDM dalam pengaruhnya pada BER terhadap  $E_b/N_0$  sistem. Dari data yang diperoleh terlihat bahwa tiap simulasi dengan jumlah *subcarrier* yang berbeda memiliki nilai BER yang tidak jauh berbeda pada tingkat  $E_b/N_0$  tertentu atau dapat dikatakan sama. Hal ini disebabkan karena parameter yang digunakan untuk melihat unjuk kerja sistem adalah  $E_b/N_0$  bukan SNR sistem, sehingga berapapun jumlah *subcarrier* yang digunakan nilai BER pada  $E_b/N_0$  tertentu akan memiliki nilai yang hampir sama.

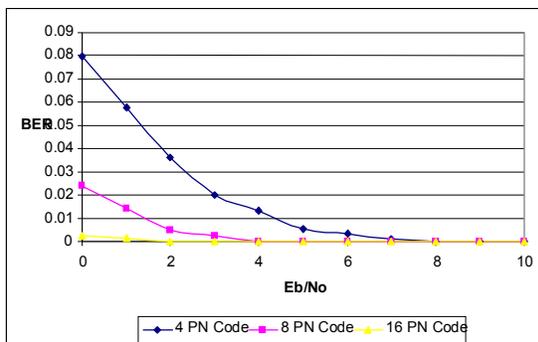
Parameter  $E_b/N_0$  biasa digunakan untuk melihat unjuk kerja sistem digital tanpa menyertakan parameter pita frekuensi, sehingga dengan parameter  $E_b/N_0$  panjang pita frekuensi yang berubah-ubah karena variasi jumlah *subcarrier* tidak berpengaruh pada sistem. Variasi jumlah *subcarrier* hanya berpengaruh dalam membagi sejumlah data yang panjang

dengan kecepatan tinggi menjadi paket-paket data yang lebih kecil dengan kecepatan yang lebih rendah pula namun tidak berpengaruh pada unjuk kerja sistem.

### Pengaruh Jumlah *Chip* Kode PN Terhadap Kinerja Sistem CDMA-OFDM.

Pada pengujian yang kedua, dilakukan pengujian terhadap perubahan jumlah *chip* kode PN yang digunakan pada sistem CDMA-OFDM untuk mengetahui unjuk kerja dari sistem tersebut. Pada pengujian ini hanya parameter jumlah *chip* kode PN saja yang divariasikan sedangkan parameter yang lain tetap. Unjuk kerja dari sistem akan ditunjukkan melalui perbandingan BER terhadap  $E_b/N_o$  sistem dengan variasi jumlah *chip* kode PN.

Untuk mengetahui pengaruh jumlah *chip* kode PN terhadap unjuk kerja dari sistem CDMA-OFDM akan dibandingkan nilai BER pada jumlah *chip* kode PN 4, 8 dan 16 dengan jumlah pengguna 4 dan pada tingkat  $E_b/N_o$  dari 0 hingga 10 dB. Gambar 11 berikut memperlihatkan perbandingan unjuk kerja sistem CDMA-OFDM untuk beberapa variasi jumlah *chip* kode PN.



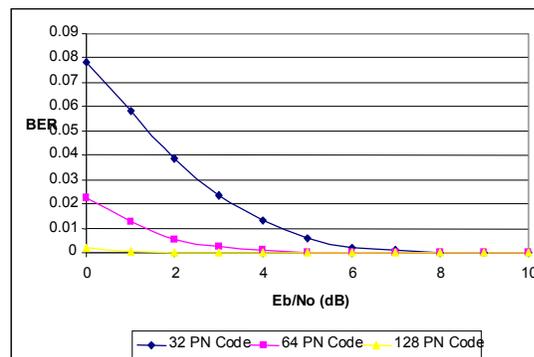
**Gambar 11. Grafik perbandingan BER terhadap  $E_b/N_o$  dengan jumlah *chip* kode PN 4, 8, dan 16.**

Dari data hasil simulasi perbandingan antara sistem CDMA-OFDM pada jumlah *chip* kode PN 4, 8 dan 16 dengan 4 pengguna, dalam grafik unjuk kerja sistem terlihat bahwa semakin banyak jumlah *chip* kode PN yang digunakan, sistem akan menunjukkan kinerja yang semakin baik, hal ini terlihat dari BER sistem yang menurun.

Pada tingkat  $E_b/N_o$  4 dB, dengan jumlah *chip* kode PN 4 sistem akan menunjukkan nilai BER sebesar 0,013184, dengan jumlah *chip* kode PN 8 sistem akan menunjukkan nilai BER sebesar 0,00024414 dan dengan jumlah *chip* kode

PN 16 sistem akan menunjukkan nilai BER sebesar 0.

Pada perbandingan kedua ini juga dilakukan variasi terhadap jumlah *chip* kode PN untuk mengetahui pengaruh jumlah *chip* kode PN terhadap unjuk kerja dari sistem CDMA-OFDM. Perbandingan unjuk kerja akan terlihat dari nilai BER pada jumlah *chip* kode PN 32, 64 dan 128 dengan jumlah pengguna 32 dan pada tingkat  $E_b/N_o$  dari 0 hingga 10 dB. Gambar 12 berikut memperlihatkan perbandingan unjuk kerja sistem CDMA-OFDM untuk beberapa variasi jumlah *chip* kode PN.



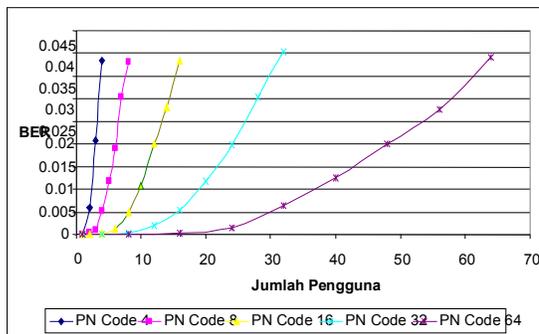
**Gambar 12. Grafik perbandingan BER terhadap  $E_b/N_o$  dengan jumlah *chip* kode PN 32, 64 dan 128.**

Dari data hasil simulasi perbandingan antara sistem CDMA-OFDM dengan jumlah *chip* kode PN 32, 64 dan 128 dengan 32 pengguna, terlihat bahwa semakin banyak jumlah *chip* kode PN yang digunakan, sistem menunjukkan kinerja yang semakin baik, hal ini dapat dilihat dari nilai BER yang menurun. Pada jumlah *chip* kode PN 32, sistem menunjukkan nilai BER 0 pada  $E_b/N_o$  9 dB. Pada jumlah *chip* kode PN 64, sistem menunjukkan nilai BER 0 pada  $E_b/N_o$  7 dB. Pada jumlah *chip* kode PN 128 sistem akan menunjukkan nilai BER 0 pada  $E_b/N_o$  3 dB. Kode PN selain berfungsi untuk membedakan antara satu pengguna dengan pengguna yang lain juga menunjukkan jumlah pengguna, semakin banyak jumlah *chip* kode PN yang digunakan semakin banyak pengguna yang dapat ditampung dalam sistem.

### Pengaruh Jumlah Pengguna Terhadap Kinerja Sistem CDMA-OFDM.

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari jumlah pengguna yang ada dalam sistem terhadap unjuk kerja dari sistem CDMA-OFDM. Pada pengujian ini hanya parameter

jumlah pengguna saja yang divariasikan sedangkan parameter yang lain tetap untuk tiap jumlah *chip* kode PN. Unjuk kerja dari sistem akan ditunjukkan melalui perbandingan BER terhadap  $E_b/N_0$  sistem dengan variasi jumlah pengguna untuk masing-masing jumlah *chip* kode PN. Nilai  $E_b/N_0$  yang digunakan tetap yaitu 2 dB dan jumlah *subcarrier* yang digunakan sebanyak 128 *subcarrier*. Nilai  $E_b/N_0$  dibuat kecil agar hasil simulasi dapat segera dilihat perubahannya. Gambar 4 berikut menunjukkan perbandingan unjuk kerja dari sistem CDMA-OFDM dengan membandingkan antara BER terhadap jumlah pengguna.



- Fadhila, Wike S., *Pengaruh Modulasi M-PSK pada Unjuk Kerja Sistem Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)*, Laporan Tugas Akhir Teknik Elektro Undip, 2009.
- Santoso, Gatot, *Sistem Selular CDMA (Code Division Multiple Access)*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2004.
- Wibisono, G., Dwi Hantoro, G., *Peluang dan Tantangan Bisnis WiMAX di Indonesia*, Informatika, Bandung, 2007.
- Sigit Puspito W.J., "Mengenal Teknologi Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) pada Komunikasi Wireless", *Elektro Indonesia*, Nomor 24, Tahun V, Januari 1999.
- Santoso, Gatot, *Sistem Selular WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access)*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2004.
- Hanzo, Lajos, M. Münster, B. J. Choi, Thomas Keller, *OFDM and MC-CDMA for Broadband Multi-User Communications, WLANs and Broadcasting*, John Wiley & Sons, Chichester, 2004.
- , *Mathematical description of OFDM*, <http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr05/ofdm/ofdmmath.htm>, Mei 2009.