

Implementasi Dan Evaluasi Kinerja Encoder-Decoder Reed Solomon Pada *M-Ary Quadrature Amplitude Modulation* (M-QAM) Menggunakan *Wireless Open-Access Research Platform* (WARP)

Nadya Noor Oktarini, Suwadi, Titiek Suryani

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: suwadi110@gmail.com, titiks@ee.its.ac.id

Abstrak—Teknik modulasi multilevel seperti *M-ary Quadrature Amplitude Modulation* (M-QAM) memiliki kelemahan yaitu semakin tinggi level modulasi yang digunakan, maka semakin tinggi pula nilai BER yang dihasilkan. Hal ini menyebabkan kinerja sistem menjadi tidak maksimal karena sistem semakin tidak tahan terhadap *noise*. Salah satu teknik *error control coding* yang digunakan untuk mendeteksi kesalahan sekaligus memperbaiki kesalahan yaitu kode Reed Solomon. Kelebihan dari kode Reed Solomon adalah sifatnya yang *non-binary* artinya data diolah dalam simbol sehingga kemampuan koreksi data lebih banyak. WARP (*Wireless Open Access Research Platform*) merupakan salah satu jenis dari teknologi SDR (*Software Defined Radio*) yang bisa diprogram untuk membuat *prototype* sistem komunikasi nirkabel. Pengimplementasian encoder dan decoder reed solomon dengan menggunakan perangkat WARP bertujuan untuk membandingkan modulasi M-QAM dengan dan tanpa kode reed solomon, kemudian mengetahui kinerja *code rate* yang berbeda pada modulasi M-QAM, serta mengetahui pengaruh besarnya daya pancar dan jarak pada sistem komunikasi. Pada sistem kode RS (15,13) memberikan perbaikan pada modulasi 4-QAM,8-QAM,16-QAM dengan nilai secara berturut-turut 2,5 dB, 2,5 dB dan 3 dB. Pada sistem kode RS (15,11) memberikan perbaikan pada modulasi 4-QAM,8-QAM,16-QAM,32-QAM, dan 64-QAM dengan nilai secara berturut-turut 3 dB, 3 dB, 5 dB, 3 dB dan 0,5 dB. Pada sistem kode RS (15,9) memberikan perbaikan pada modulasi 4-QAM,8-QAM,16-QAM,32-QAM, dan 64-QAM dengan nilai secara berturut-turut 4,5 dB, 4,5 dB, 6 dB, 5 dB dan 3 dB. Hasil implementasi terburuk terdapat pada sistem RS (15,13) dibandingkan dengan sistem RS (15,11) dan RS (15,9). Hasil ini karena RS (15,13) hanya memiliki kemampuan koreksi *error ganda* ($t=1$) dengan ukuran k yang sama. Sementara Hasil implementasi terbaik terdapat pada sistem RS (15,9) yang mana dapat memperbaiki kesalahan di semua level modulasi karena memiliki kemampuan koreksi *error ganda* ($t=3$) dengan ukuran k yang sama. Dari hasil implementasi juga didapatkan kesimpulan bahwa nilai BER akan semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar tetap, ini menandakan jarak sangat mempengaruhi kualitas kinerja suatu sistem komunikasi.

Kata Kunci—M-QAM, Reed Solomon, WARP

I. PENDAHULUAN

Dalam sistem komunikasi digital data ditransmisikan dalam bentuk bit-bit biner. Oleh sebab itu dibutuhkan sistem yang tahan terhadap *noise* pada kanal transmisi, sehingga data

yang ditransmisikan melalui kanal dapat diterima dengan benar. Kesalahan dalam pengiriman atau penerimaan data merupakan permasalahan mendasar yang memberikan dampak yang sangat signifikan pada sistem komunikasi.

Teknik modulasi *M-ary Quadrature Amplitude Modulation* (M-QAM) adalah salah satu teknik modulasi digital multi level yang saat ini banyak digunakan pada sistem komunikasi. Hal ini disebabkan karena konstelasi sinyal M-QAM yang tidak begitu rapat dan kemungkinan terjadinya *bit error* lebih kecil, bila dibandingkan dengan sistem modulasi lainnya seperti *M-ary Quadrature Phase Shift Keying* (M-QPSK). Namun teknik modulasi masih memiliki kelemahan yaitu semakin tinggi level modulasi yang digunakan, maka semakin tinggi pula nilai BER yang dihasilkan hal ini menyebabkan kinerja sistem menjadi tidak maksimal.

Untuk mengatasinya, maka diperlukan suatu mekanisme *error control coding* untuk mendeteksi kesalahan sekaligus memperbaiki kesalahan. Salah satu teknik *error control coding* yang paling banyak dipakai karena kemampuan koreksinya yang besar adalah kode Reed Solomon. Kelebihan dari kode Reed Solomon adalah sifatnya yang *non-binary* artinya data diolah dalam simbol sehingga kemampuan koreksi data lebih banyak. Pada Tugas Akhir kode Reed Solomon akan diimplementasikan menggunakan modulasi M-QAM dengan menggunakan sebuah modul *Wireless Open Access Research Platform* (WARP) sebagai pemancar dan penerima.

Tujuan yang diharapkan tercapai setelah selesainya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

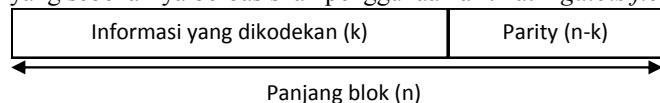
1. Mengetahui perbedaan M-QAM tanpa dan dengan kode Reed Solomon yang diimplementasikan menggunakan modul WARP.
2. Mengetahui kombinasi nilai (n,k,t) pada kode Reed Solomon yang mampu memperbaiki kinerja M-QAM dengan nilai M tertentu. Pengkodean yang digunakan yaitu kode Reed Solomon (15,13,1), (15,11,2) dan (15,9,3).

II. DASAR TEORI

A. Encoder Reed Solomon

Sejarah awal kode Reed Solomon dirumuskan oleh *Irving Reed* dan *Gus Solomon* pada tahun 1960. Reed

Solomon merupakan salah satu teknik *error control coding* yang dipakai dalam sistem komunikasi. Proses koreksi dilakukan dengan mengganti simbol yang salah dengan simbol yang sebenarnya berbasiskan penggunaan aritmatik *galois field*



Gambar 2.1 Definisi dari kode Reed Solomon

Sebuah kode Reed Solomon seperti gambar diatas dapat dituliskan dalam bentuk $RS(n,k)$ dimana :

n adalah panjang blok kode yang dinyatakan oleh $n = 2^m - 1$.

m adalah jumlah bit per simbol

k adalah jumlah simbol data yang akan dikodekan.

t adalah jumlah simbol *error* yang mampu diperbaiki yang dinyatakan oleh $t = \frac{n-k}{2}$

Proses *encoding* pada Reed Solomon dijalankan melalui beberapa tahap yaitu :

- **Pembangkitan kode generator**

Sebuah Reed Solomon dibuat dengan membentuk code generator polynomial. Polinomial tersebut terdiri dari $n-k=2t$ faktor, yaitu :

$$g(x) = g_0 + g_1 x + g_2 x^2 + \dots + g_{2t-1} x^{2t-1} + x^2 \\ = (x + \alpha^0)(x + \alpha^1) \dots (x + \alpha^{2t-1}) \quad \dots (1)$$

Reed solomon dengan $GF(16)$, memiliki kode generator :

$$g(x) = (x + \alpha^0)(x + \alpha^1)(x + \alpha^2)(x + \alpha^3) \\ g(x) = x^4 + x^3 \alpha^3 + x^3 \alpha^2 + x^2 \alpha^5 + x^3 \alpha + x^2 \alpha^4 + 2x^2 \alpha^3 + x \alpha^6 + x^3 + x^2 \alpha^6 \\ + x \alpha^5 + x^2 \alpha + x \alpha^4 + x \alpha^3 + \alpha^6 \\ g(x) = x^4 + x^3(\alpha^4 + \alpha^3 + \alpha^2 + 1) + x^2(\alpha^5 + \alpha^4 + \alpha^3 + \alpha^2 + \alpha) + \\ x(\alpha^6 + \alpha^5 + \alpha^4 + \alpha^3) + \alpha^6 \\ g(x) = x^4 + \alpha^{12} x^2 + \alpha^4 x^2 + \alpha^0 x + \alpha^6 \\ g(x) = x^4 + 15x^2 + 3x^2 + x + 12 \quad \dots (2)$$

- **Penambahan parity (codeword)**

Pada kode Reed Solomon penambahan parity sebanyak $2t$ atau $(n-k)$ bit diletakkan dibelakang data yang akan dikirim. Dengan adanya penambahan bit parity maka dapat membantu decoder untuk melakukan fungsi deteksi error dan koreksi error. Sebagai contoh data informasi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 dikirim dengan menggunakan kode $RS(15,11)$ yaitu dengan 11 bit data yang akan dikodekan, maka penambahan parity sebanyak $n-k$ yaitu 4 bit.

B. Decoder Reed Solomon

- **Sindrome Error**

Pencarian sindrom bertujuan untuk menentukan kondisi paket apakah yang diterima mengalami kerusakan atau tidak. Dari data yang dikirim apabila data tidak mengalami perubahan pada saat diterima, maka hasil dari elemen sindrom adalah 0.

- **Error Polinomial**

Mencari polinomial error dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa metode, antara lain algoritma Peterson, Berlekamp-Massey serta Euclidean.

- **Lokasi Error**

Penentuan lokasi error diperoleh dengan menggunakan polinomial $\Lambda(x)$ yang telah diperoleh dari langkah

sebelumnya. Masing-masing data pada posisinya akan dicek satu persatu dengan mensubstitusi variable x pada $\Lambda(x)$ dengan nilai inverse α .

- **Magnitude Error/Nilai Error**

Mencari magnitude error merupakan langkah selanjutnya yang digunakan untuk mencari letak error data.

- **Mengembalikan Error/Nilai Error**

Perbaikan terhadap error yang terjadi dapat dilakukan dengan cara menjumlahkan antara data pada lokasi error dengan besar error yang diterima.

C. Modulasi M-QAM

Quadrature Amplitude Modulation (QAM) merupakan salah satu teknik modulasi digital. Pada modulasi M-QAM, titik-titik konstelasi dibuat dalam bentuk kotak dengan jarak vertikal dan horizontal yang sama. M adalah jumlah maksimum data pada M-QAM dalam bentuk deretan bit. Pada M-QAM umumnya, keluaran pengubah bit-ke-simbol akan dipetakan kedalam koordinat konstelasi sinyal biner *In-Phase* (I) dan *Quadrature* (Q) terlebih dulu sebelum dipetakan ke analog.

D. Wireless Open-Access Research Platform (WARP)

(2.7)

(2.8)

(2.9)

(2.10)

(2.11)



Gambar 2.2 Perangkat Wireless Open-Access Research Platform

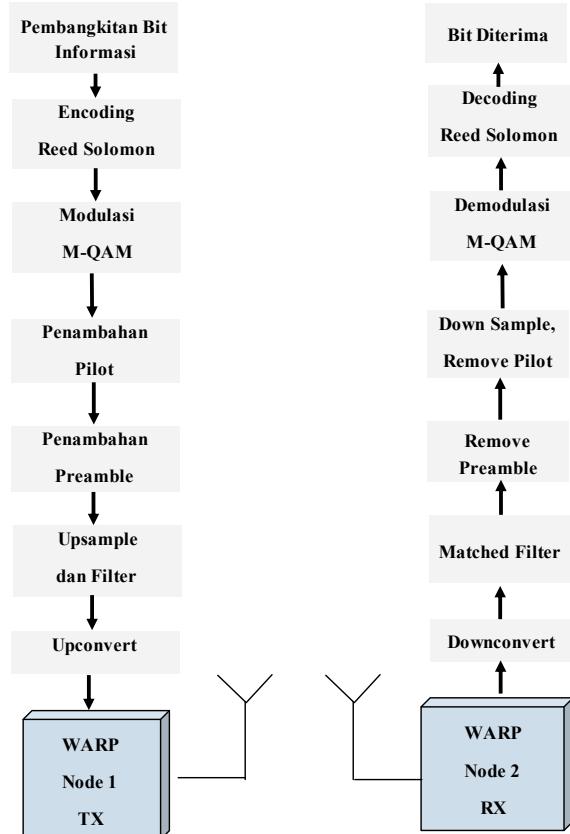
WARP merupakan salah satu perangkat radio yang bisa diprogram untuk membuat prototype jaringan wireless. WARP menggabungkan perangkat dengan kemampuan tinggi yang bisa diprogram dengan repository open-source [1].

Pada dasarnya, WARP merupakan salah satu bentuk *Software Defined Radio* yang dikembangkan sebagai modul penelitian tentang sistem komunikasi nirkabel. WARP merupakan sebuah *FPGA* (*Field Programmable Gate Array*) atau modul *DSP* (*Digital Signal Processing*) yang terhubung dengan modul radio.

Platform ini memiliki banyak keunggulan, salah satunya adalah WARP dibuat dengan disain perangkat keras khusus, mengintegrasikan sumber daya pengolahan berbasis *FPGA* dengan antar muka radio nyata. Selain itu *platform* ini didukung dengan modul khusus yang memudahkan pengguna dari berbagai pengolahan *hardware* dan sumber daya *peripheral*. *Platform* ini juga mendukung modul-modul digunakan untuk membangun berbagai aplikasi penelitian, termasuk implementasi *real time* dari *physical layer* dan *MAC layer*. [1]

III. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

A. Perancangan Sistem di Pemancar dan Penerima



Gambar 3.1 Blok Diagram Sistem Kode Reed Solomon dengan Teknik Modulasi M-QAM

Sistem yang dikerjakan pada tugas akhir ini yaitu pembangunan sistem pemancar dan penerima kemudian diimplementasikan dengan menggunakan modul WARP. Pada sisi pemancar, sinyal yang dibangkitkan secara *random* (acak), kemudian data dikodekan dengan kode reed Solomon. Keluaran hasil *encoding* reed solomon ini diberikan ke dalam variabel *data* yang kemudian dimodulasi dengan modulasi M-QAM. Sebelum data dikirimkan melalui WARP perlu dilakukan proses penambahan pilot yang digunakan sebagai respon estimasi kanal disisi pengirim. Setelah itu dilakukan Penambahan *preamble* dimaksudkan untuk sinkronisasi transmisi dengan menggunakan deretan bit yang telah diketahui oleh *system* kemudian diletakkan pada awal deretan bit informasi yang dikirim. Setelah itu dilakukan proses *upsample* yang bertujuan untuk meningkatkan *sampling rate* dari data yang dikirim. Kemudian hasil sampling akan di filter. Sebelum sinyal dikirimkan, sinyal akan di *upconvert* ke frekuensi 5 MHz. Untuk menghindari pelemahan sinyal dari radio DC proses *upconvert* disisi pengirim digunakan untuk meningkatkan sinyal dari frekuensi modulasi kedalam frekuensi yang lebih tinggi dengan menggeser frekuensi tengah sinyal *bassband*.

Sementara disisi penerima, proses yang ada

merupakan kebalikan dari proses yang ada di pengirim. Setelah proses demodulasi dilakukan proses *decoding* dengan reed solomon sehingga diperoleh bit keluaran. Selanjutnya dilakukan perhitungan BER dengan membandingkan bit masukan sebelum proses *encoding* dan bit keluaran setelah proses *decoding*.

B. Implementasi dengan Sistem WARP

Pada Tugas Akhir ini menggunakan dua modul WARP versi 2 yaitu *node 1* sebagai pemancar dan *node 2* sebagai penerima, proses integrasi WARP dengan PC menggunakan *switch ethernet* dan kabel LAN, seperti dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Konfigurasi Sistem Komunikasi dengan WARP

Pada pelaksanaan tugas akhir ini digunakan WARPLab versi 7.1, WARP ini akan diintegrasikan dengan PC. WARPLab digunakan agar sinyal yang dibangkitkan melalui program Matlab bisa dikirimkan antar modul WARP secara *real time*. Langkah-langkah pengintegrasian PC dengan WARP adalah sebagai berikut :

1. Menghubungkan PC dengan WARP dengan *switch ethernet* menggunakan kabel LAN seperti pada Gambar 4.
2. Mengatur IP pada PC dan *warplab_defines* pada program Matlab (IP yang digunakan harus sama antara PC dan Matlab).
3. Buka *Command Prompt*, lakukan : ping 10.0.0.1 untuk WARP Node 1 dan ping 10.0.0.2 untuk WARP Node 2. Ini untuk melihat apakah antara Komputer dan WARP telah tersambung.
4. Mengatur nomor IP pada WARP menjadi 10.0.0.1 untuk *node 1* (pengirim) dan 10.0.0.2 untuk *node 2* (penerima) kemudian lakukan cek koneksi pada matlab dengan membuka Matlab kemudian pilih folder *M_Code_Reference*, pada *Command Window Setup WARPLab* : *wl_setup* dan *Check Connection* : *wl_initNodes(2)*

C. Perhitungan Bit Error

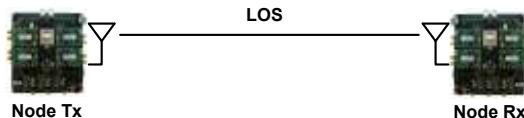
Setelah didapatkan estimasi data bit informasi pada output, BER dihitung dengan membandingkan antara deretan *bit* pada pengirim dengan deretan *bit* yang dideteksi pada sisi penerima, kemudian jumlah *bit* yang salah dibagi dengan jumlah *bit* yang dibangkitkan. Kinerja dari hasil simulasi akan membahas tentang :

- Perhitungan BER dengan mengubah Gain Daya Pancar Pengukuran Ber terhadap fungsi daya pancar dilakukan untuk mengetahui pengaruh daya pancar terhadap BER daya pancar di ubah-ubah. Nilai gain yang diizinkan pada WARP adalah 0 – 63 dB.

- Perhitungan BER dengan mengubah variasi code rate
Pada Tugas akhir ini menggunakan kode reed solomon RS(15,13) dengan kemampuan koreksi 1, RS(15,11) dengan kemampuan koreksi 2 dan RS(15,9) dengan kemampuan koreksi 3.

D. Metode Pengukuran

Pada Tugas Akhir ini pengukuran dilakukan didalam ruangan (*indoor*) yang dilakukan di ruang B304 Laboratorium Telekomunikasi Multimedia Jurusan Teknik Elektro dengan kondisi LOS yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.

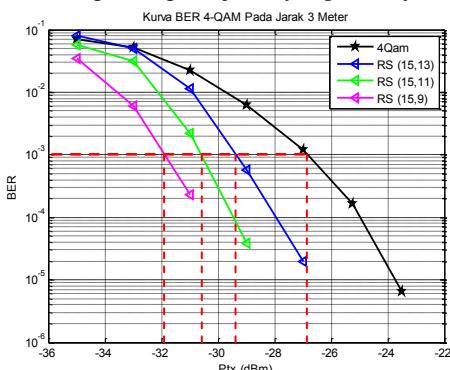


Gambar 3.3 kondisi *Line of Sight (LOS)*

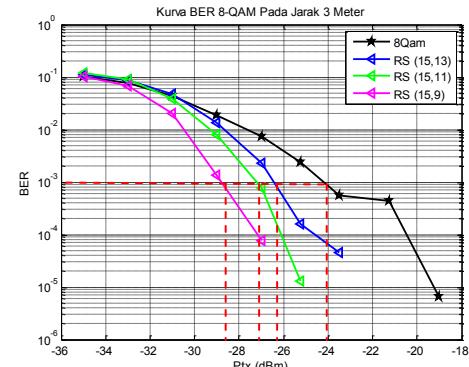
IV. HASIL DAN ANALISA DATA

A. Analisa sistem dengan kode reed solomon dan tanpa kode reed solomon

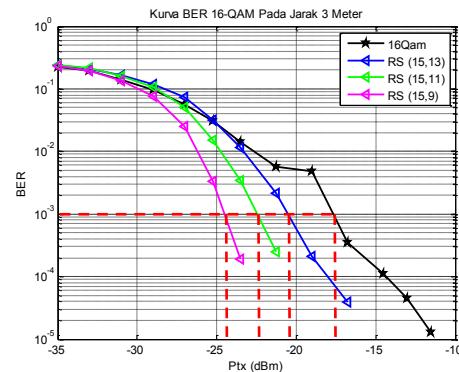
Pada pengukuran ini dilakukan pengamatan terhadap kinerja sistem untuk mengetahui bagaimana pengaruh besar *code rate* teknik kode reed solomon terhadap kinerja sistem modulasi M-QAM sehingga didapatkan analisa nilai perbaikan yang diperoleh dengan membandingkan kondisi modulasi M-QAM dengan dan tanpa menggunakan kode reed solomon. Nilai perbaikan tersebut disebut nilai *coding gain*. Dalam pengukuran ini, *coding gain* adalah ukuran perbedaan level daya pancar (Ptx) antara sistem tanpa pengkodean dan sistem dengan pengkodean yang diperlukan untuk mencapai nilai BER yang sama. Pengukuran ini dilakukan dengan 3 *code rate* yang berbeda yaitu RS(15,13), RS(15,11) dan RS(15,9). Pengukuran dilakukan dengan mengubah level daya pancar (Tx_Rf) dari 0 sampai 60 pada jarak yang sama yaitu 3 meter.



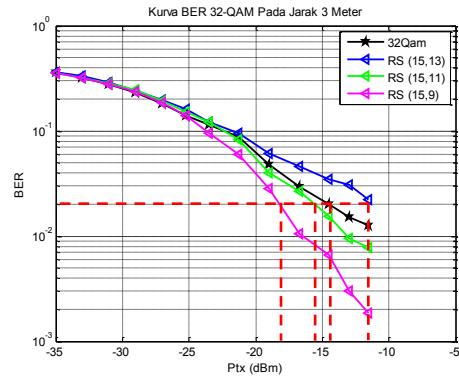
Gambar 4.1 Kinerja BER 4-QAM terhadap level daya pancar berdasarkan *code rate* yang berbeda



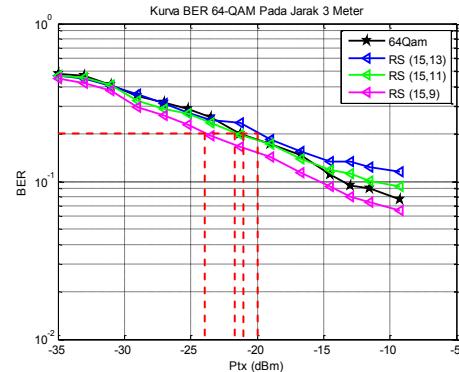
Gambar 4.2 Kinerja BER 8-QAM terhadap level daya pancar berdasarkan *code rate* yang berbeda



Gambar 4.3 Kinerja BER 16-QAM terhadap level daya pancar berdasarkan *code rate* yang berbeda



Gambar 4.4 Kinerja BER 32-QAM terhadap level daya pancar berdasarkan *code rate* yang berbeda



Gambar 4.5 Kinerja BER 64-QAM terhadap level daya pancar berdasarkan *code rate* yang berbeda

Pada modulasi dengan level yang tinggi seperti 32-QAM dan 64-QAM, pengaruh penggunaan *coding* tidak terlihat terlalu signifikan. Dapat diamati bahwa kurva antara modulasi tanpa *coding* dan modulasi dengan memakai *coding* terlihat semakin rapat. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi level modulasi yang digunakan kinerja sistem semakin rentan terhadap *noise*. Sehingga nilai BER masih terlihat relatif tinggi, meskipun telah dilakukan penekanan nilai BER dengan teknik *forward error control* namun jumlahnya tidak terlalu besar.

Berdasarkan Gambar 4.1, Gambar 4.2, Gambar 4.3, Gambar 4.4, Gambar 4.5 didapatkan analisa nilai perbaikan yang diperoleh dengan membandingkan kondisi modulasi M-QAM dengan dan tanpa menggunakan kode reed solomon. Nilai perbaikan tersebut disebut nilai *coding gain*. Dalam pengukuran ini, *coding gain* adalah ukuran perbedaan level daya pancar (Ptx) antara sistem tanpa pengkodean dan sistem dengan pengkodean yang diperlukan untuk mencapai nilai BER yang sama.

Tabel 4.1 Gain coding reed solomon terhadap modulasi M-QAM

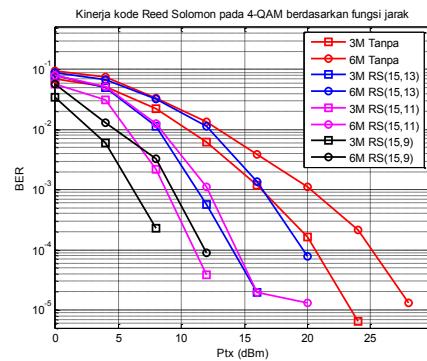
| Modulasi | BER | Coding Gain (dB) | | |
|----------|------------------|------------------|------------|-----------|
| | | RS (15,13) | RS (15,11) | RS (15,9) |
| 4-QAM | 10 ⁻¹ | 2,5 | 3,5 | 4,8 |
| 8-QAM | 10 ⁻¹ | 2,2 | 3 | 4,5 |
| 16-QAM | 10 ⁻¹ | 2,5 | 5 | 6 |
| 32-QAM | 10 ⁻¹ | - | 2 | 4 |
| 64-QAM | 10 ⁻¹ | - | 0,5 | 3 |

Berdasarkan tabel 4.1 dapat diamati bahwa semakin besar kemampuan memperbaiki kesalahan yang dimiliki kode reed solomon, maka akan memberikan perbaikan yang lebih besar pula.

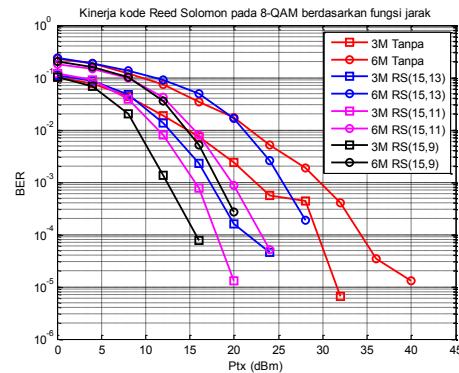
Kondisi dengan menggunakan kode reed solomon (15,13) t=1 menjadi lebih efisien dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan kode reed solomon pada tingkat modulasi 4-QAM, 8-QAM, dan 16-QAM sementara pada tingkat modulasi 32-QAM dan 64-QAM reed solomon (15,13) sudah tidak dapat melakukan perbaikan. Kondisi dengan menggunakan kode reed solomon (15,11) t=2 menjadi lebih efisien dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan kode reed solomon pada tingkat modulasi 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM. Kondisi dengan menggunakan kode reed solomon (15,9) t=3 menjadi lebih efisien dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan kode reed solomon pada semua tingkat modulasi yaitu 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM. Kode reed solomon (15,9) memiliki kemampuan koreksi yang lebih banyak daripada kode yang lain. Meskipun kode reed solomon (15,11) juga memiliki kemampuan untuk memperbaiki kesalahan pada semua tingkat level modulasi namun nilai yang dihasilkan kode reed solomon (15,9) lebih kecil dan cenderung lebih efisien.

B. Analisa sistem kode reed solomon berdasarkan fungsi jarak

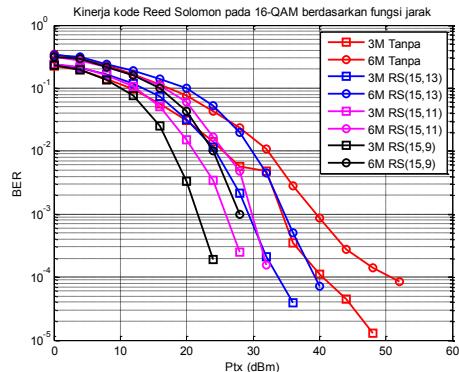
Pada pengukuran ini dilakukan pengamatan terhadap kinerja sistem untuk mengetahui bagaimana pengaruh jarak antara penerima dan pemancar pada sebuah sistem komunikasi.



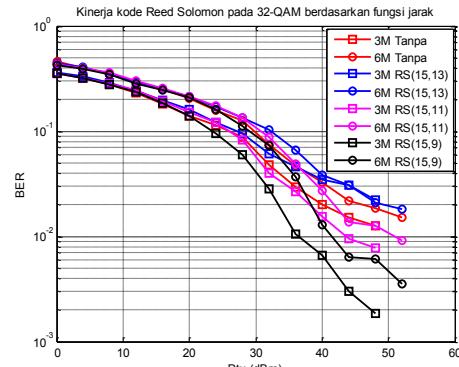
Gambar 4.6 Kinerja kode RS pada 4-QAM berdasarkan jarak



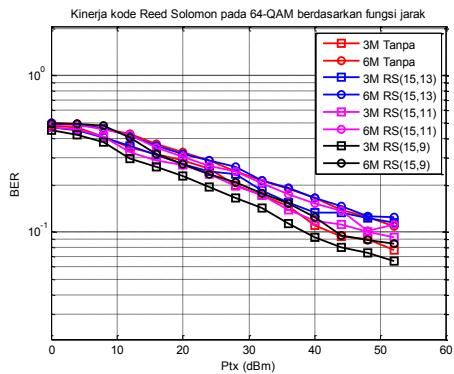
Gambar 4.7 Kinerja kode RS pada 8-QAM berdasarkan jarak



Gambar 4.8 Kinerja kode RS pada 16-QAM berdasarkan jarak



Gambar 4.9 Kinerja kode RS pada 32-QAM berdasarkan jarak

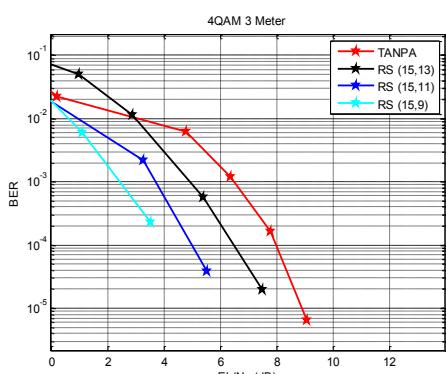


Gambar 4.10 Kinerja kode RS pada 64-QAM berdasarkan fungsi jarak

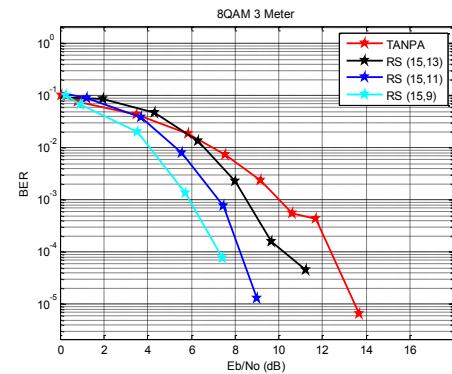
Dari hasil pengukuran terhadap fungsi jarak, pada reed solomon seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6, gambar 4.7, gambar 4.8, gambar 4.9 dan gambar 4.10. Dari hasil pengukuran ini dapat diamati bahwa, pada saat pengukuran dengan jarak antara pemancar dan penerima sebesar 3 meter, menghasilkan nilai BER yang lebih kecil sementara ketika jarak antara pemancar dan penerima sebesar 6 meter, menghasilkan nilai BER yang lebih besar pada setiap level modulasi. Hal ini menandakan bahwa jarak dan daya pancar mempengaruhi kualitas kerja sistem komunikasi. Semakin jauh jarak antara antena pemancar dan penerima maka sinyal yang di transmisikan dengan daya pancar yang tetap akan mengalami pelemahan sehingga nilai BER semakin besar.

C. Analisa sistem kode reed solomon terhadap Eb/No

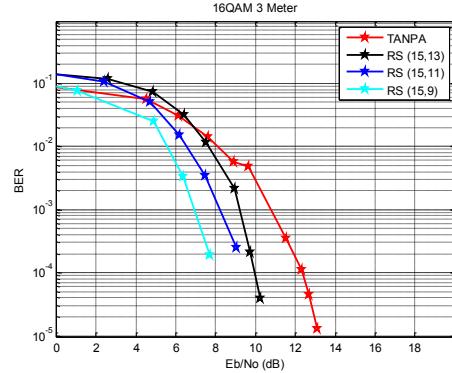
Analisa pada nilai Eb/No dilakukan untuk melihat seberapa besar energy bit yang diterima jika dibandingkan dengan noise. Hasil implementasi kinerja BER sistem kode reed solomon terhadap Eb/No disajikan pada gambar dibawah ini.



Gambar 4.11 Kinerja BER terhadap Eb/No pada modulasi 4-QAM



Gambar 4.12 Kinerja BER terhadap Eb/No modulasi 8-QAM



Gambar 4.13 Kinerja BER terhadap Eb/No pada modulasi 16-QAM

Pada Gambar 4.17, Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 dapat terlihat bahwa perbandingan nilai BER dengan Eb/No memiliki kinerja yang sama seperti analisa sebelumnya. Untuk modulasi ini dapat terlihat jelas perbaikan antar *code rate*, dimana perbaikan tersebut menunjukkan bahwa nilai pengkoreksi RS (15,9) ($t=3$) memiliki kinerja yang paling baik dibandingkan nilai pengkoreksi lainnya. Ditinjau dari hasil pengukuran BER terhadap Eb/No juga didapatkan hasil bahwa dengan menggunakan kode reed solomon kinerja sistem modulasi 4-QAM, 8-QAM dan 16-QAM akan lebih baik dibandingkan dengan kondisi tanpa kode reed solomon.

Semakin besar nilai SNR, BER yang dihasilkan semakin kecil. Pada modulasi 32-QAM dan 64-QAM konstelasi simbol yang diterima sangat jelek karena variasi *noise* nya juga besar. Sehingga *error* yang dihasilkan juga sangat besar dan tidak beraturan. Oleh karena itu pada modulasi 32-QAM dan 64-QAM tidak dapat diperoleh nilai Eb/No nya.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Setelah dilakukan serangkaian pengukuran terhadap sistem yang dibangun maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai BER semakin kecil terhadap bertambahnya daya yang dipancarkan untuk jarak antar *node* tetap.
2. Semakin tinggi orde modulasi yang digunakan, nilai BER yang dihasilkan semakin besar.
3. Modul WARP memiliki keterbatasan untuk mengimplementasikan level modulasi tingkat tinggi seperti 32-QAM dan 64-QAM, sehingga sangat diperlukan adanya mekanisme *forward error control* dengan kemampuan

koreksi yang besar untuk memperbaiki kinerjanya yaitu Reed Solomon (15,9) dengan kemampuan koreksi ($t=3$)

4. Hasil implementasi terburuk terdapat pada sistem RS (15,13) dibandingkan dengan sistem RS (15,11) dan RS (15,9). Hasil ini karena RS (15,13) hanya mempunyai kemampuan koreksi error ganda ($t=1$) dengan ukuran k yang sama. Sementara Hasil implementasi terbaik terdapat pada sistem RS (15,9) mempunyai kemampuan koreksi error ganda ($t=3$) dengan ukuran k yang sama.
5. Nilai BER semakin besar terhadap bertambahnya jarak antar *node* untuk daya pancar tetap, ini menandakan jarak sangat mempengaruhi kualitas kinerja suatu sistem komunikasi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] WARP Project - Wireless Open Access Research Platform. <http://warp.rice.edu/trac/wiki/about>