

PEMODELAN NON-UNIFORM CODED-MODULATIO PADA KANAL AKUSTIK BAWAH AIR DI LINGKUNGAN PERAIRAN DANGKAL

Sholihah Ayu Wulandari¹, Tri Budi Santoso¹, I Gede Puja Astawa¹, Muhammad Milchan²

¹ Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Kampus ITS,
Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur Indonesia

²Politeknik Negeri Bengkalis,
Jl. Bathin Alam, Sungai Alam Bengkalis Riau Indonesia

Email: sholihah.ayuwulan@gmail.com¹, tribudi@pens.ac.id¹, puja@pens.ac.id¹, milchan@polbeng.ac.id²

Abstrak

Dalam paper ini, disajikan evaluasi kinerja OFDM dengan *Non-uniform Coded-Modulation* pada kanal akustik bawah air perairan dangkal. Deretan informasi biner dikodekan BCH code (7,4) untuk koreksi kesalahan dan dikombinasikan dengan *Non-uniform modulation* yang merupakan hasil modifikasi susunan *subcarrier* dari standar OFDM IEEE 802.11a. Pemodelan menggunakan 52 *subcarrier* yang terdiri dari 4 pilot dan 48 data *subcarrier* yang dibagi menjadi tiga bagian, yaitu: 24 data *subcarrier* dengan modulasi *16-Quadrature Amplitude Modulation* (16-QAM), 12 data *subcarrier* dengan modulasi *Quadrature fase-shift keying* (QPSK), dan 12 data *subcarrier* lainnya dengan modulasi *Binary key-shift keying* (BPSK). Jenis kanal yang digunakan menggambarkan kondisi *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) dan merupakan hasil dari data pengukuran. Analisis dilakukan dalam hal *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR) dan *Bit Error Rate* (BER) menunjukkan bahwa pada nilai *error rate* 0.001, modulasi BPSK, QPSK, 16-QAM, dan *Non-uniform Modulation* membutuhkan daya masing-masing 5 dB, 8,5 dB, 10,3 dB, dan 7,9 dB. Tetapi sistem yang diusulkan mampu menekan daya yang diperlukan sampai sebesar 6 dB. Sistem yang diusulkan juga menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan *fixed* modulasi dan *Non-uniform Modulation*, yang dalam hal ini dengan daya yang rendah untuk mencapai *error rate* yang sama. Selain itu, sistem yang diusulkan memiliki *coding gain* sebesar 1,9 dB dibandingkan dengan sistem tanpa kode (*Non-uniform Modulation*). Pengujian *real* juga dilakukan dengan data pengukuran di Muara Mangrove, Surabaya. Hasilnya menunjukkan kinerja yang mirip dengan simulasi yang dilakukan pada kanal dengan *noise Gaussian*.

Kata Kunci: *Non-uniform coded-modulation, OFDM, perairan dangkal.*

Abstract

In this paper, presented an OFDM performance evaluation with the *Non-uniform Coded-Modulation* in the underwater acoustic channel in shallow water. A row of binary information is encoded by BCH code (7.4) for error correction and combined with *Non-uniform modulation* which is the result of modification of the *subcarrier* arrangement of the OFDM standard IEEE 802.11a. Modeling uses 52 *subcarriers* consisting of 4 pilots and 48 *subcarrier* data which are divided into three parts, i.e.: 24 *subcarrier* data with *16-Quadrature Amplitude Modulation* (16-QAM) modulation, 12 *subcarrier* data with *Quadrature phase-shift keying* (QPSK) modulation and 12 other data *subcarriers* with *Binary key-shift keying* (BPSK) modulation. The channel type used describes the *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) condition and is the result of measurement data. The analysis is done in terms of *Signal-to-Noise-Ratio* (SNR) and *Bit Error Rate* (BER) show that the value of the error rate of 0.001, modulation of BPSK, QPSK, 16-QAM, and *Non-uniform modulation* required the power each 5 dB, 8.5 dB, 10.3 dB, and 7.9 dB. However, the proposed system is able to suppress the required power up to 6 dB. The proposed system also shows better performance than *fixed* modulation and *Non-uniform Modulation*, which in this case with low power to achieve the same error rate. In addition, the proposed system has a *coding gain* of 1.9 dB compared to a *non-uniform modulation* system. Real testing is also done with measurement data at Mangrove estuary, Surabaya. The results show performance similar to simulations performed on *Gaussian noise* channels.

Keywords: *Non-uniform coded-modulation, OFDM, shallow water.*

1. PENDAHULUAN

Seperti kita ketahui Sebelumnya bahwa kanal komunikasi bawah air sangat berbeda dengan kanal komunikasi udara bebas. Kanal radio yang menggunakan gelombang elektromagnetik dalam proses transmisi. Tetapi gelombang elektromagnetik tidak

sesuai bila di aplikasikan pada kanal bawah air. Hal ini disebabkan oleh redaman yang sangat besar sehingga jangkauan gelombang elektromagnetik pada kanal bawah air akan sangat terbatas [1].

Gelombang akustik adalah jenis gelombang yang menjadi solusi untuk kanal bawah air karena memiliki ketahanan yang lebih baik.

Penelitian untuk pemanfaatan gelombang akustik saat ini belum banyak dikembangkan untuk wilayah tropis, walaupun ada beberapa yang telah melakukan kajian seperti pada perairan dangkal untuk wilayah para nelayan [2]. Dalam implementasi, sistem ini dihadapkan dengan kondisi kanal yang buruk, seperti *delay spread* yang lebar, efek *Doppler*, dan *bandwidth* yang terbatas [3] [4]. Selain itu, dalam hal propagasi banyak sekali sumber *noise* yang terdapat pada kanal akustik bawah air, seperti *noise* yang bersumber dari perahu nelayan, suara gelombang air maupun suara dari hewan-hewan yang terdapat pada bawah air. Hal ini menyebabkan tantangan tersendiri untuk mengembangkan komunikasi bawah air menggunakan gelombang akustik.

Kanal akustik bawah air terbagi ke dalam tiga bagian yaitu laut dalam (*Deep Water*), kedalaman sedang (*Medium*) serta laut dangkal (*Shallow Water*). Masing-masing kanal memiliki karakteristik yang berbeda, sehingga tiap kanal memiliki permasalahan yang berbeda pula. Pada perairan dangkal keadaan fisik kanal yang paling berpengaruh adalah berupa pantulan sinyal dari permukaan air dan dasar perairan, dimana kejadian ini secara umum dinamakan sebagai *multipath effect* [5] [6].

Teknik OFDM muncul sebagai alternatif yang menjanjikan untuk sistem *multicarrier* untuk komunikasi UWA karena ketahanannya terhadap saluran yang menunjukkan *delay spread* yang lama dan kondisi kanal frekuensi *selective* [7] [8] [9]. Tetapi saluran akustik bawah air cepat bervariasi secara spasial dan temporer [9] [10] sehingga menyebabkan nilai SNR yang tidak konsisten. Salah satu cara untuk mengantisipasi hal ini adalah menggunakan teknik modulasi adaptif pada sistem OFDM [11] [12]. Pada modulasi adaptif, *transmitter* menentukan tipe modulasi yang sesuai dengan kondisi kanal. Tetapi SNR tidak bertambah banyak seiring dengan meningkatnya daya transmisi karena adanya *noise impuls* dan keterbatasan estimasi saluran tidak sempurna. Penggunaan *Forward Error Correction* (FEC) dapat memperbaiki nilai

SNR, sehingga dapat meningkatkan kinerja sistem OFDM [13]. Teknik FEC yang digunakan seperti Hamming code, BCH Code, dan Cyclic Code [2] [13] [14]. Secara umum BCH code menunjukkan kinerja lebih baik dibanding Hamming code dan Cyclic code [14]. Penggunaan teknik FEC dapat dikembangkan menjadi suatu sistem *Adaptive Modulation and Coding* (AMC). Teknik AMC menarik untuk komunikasi bawah air, sehingga teknik ini digunakan untuk mengatasi masalah pada komunikasi bawah air [9] [15]. Teknik ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi sistem dengan mencocokkan parameter transmisi dengan kondisi kanal.

Pada paper ini, diusulkan suatu pemodelan *Non-uniform coded-modulation* pada teknik OFDM. Sistem ini didasarkan model *Non-uniform modulation* [16] yang dikombinasikan dengan teknik pengkodean, yaitu BCH code (7,4). Teknik pengkodean BCH code (7,4) digunakan sebagai *error* koreksi. Sistem ini menggunakan lebih dari satu jenis modulasi pada *subcarrier* untuk mendapatkan nilai SNR. Dalam hal ini, teknik modulasi yang digunakan adalah BPSK, QPSK, dan 16-QAM. Pemodelan dibuat untuk menekan nilai *bit error rate* (BER) sebesar 0.001. Model saluran yang ditetapkan untuk lingkungan akustik bawah air memperoleh deskripsi sederhana tentang parameter saluran, yaitu kebisingan sekitar dengan saluran *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) [17]. Pengujian kinerja sistem juga dilakukan pada saluran dengan data *real* di Muara Mangrove, Surabaya.

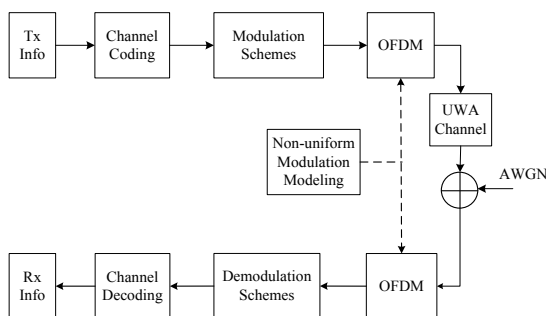
2. MODEL SISTEM

A. Model Blok Diagram Non-uniform Coded-Modulation

Pemodelan sistem *Non-uniform Coded-Modulation* pada *subcarrier* dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1. Model ini merupakan modifikasi dari pemodelan yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [16].

Pada bagian pengirim diawali dengan pembangkitan data *biner*. Deretan data *biner* ini dikodekan dengan menggunakan BCH code. Data terkode dimodulir menggunakan *Non-uniform modulation*. Tiga jenis modulasi yang digunakan dalam pemodelan yaitu modulasi BPSK, QPSK, dan 16QAM.

Pada blok OFDM pengirim, data yang sudah dalam format *Non-uniform Coded-Modulation* dikonversi dari serial ke paralel. Panjang data *subcarrier* ini adalah 52. Sebelum melalui proses IFFT, data ditambahkan suatu *guard interval* yang dalam hal ini berupa bit 0 untuk menghindari interferensi antar pengguna OFDM satu dengan yang lainnya pada frekuensi berdekatan. Penambahan jumlah bit 0 menyesuaikan dengan besar IFFT/FFT yang digunakan, dalam hal ini adalah 64. Proses IFFT merupakan inti dari modulasi *multicarrier* OFDM, karena IFFT berfungsi sebagai *baseband* modulator yang akan membangkitkan *subcarrier-subcarrier* yang saling *orthogonal*. Penambahan *Cyclic Prefix* dilakukan dengan cara menyalin deretan akhir simbol OFDM dengan periode tertentu, pada simulasi ditambahkan *Cyclic Prefix* sebanyak 25% FFT *length*. Dari 25% FFT *length* tersebut kemudian menambahkannya pada bagian awal dari simbol. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk menjaga *orthogonalitas* masing-masing *subcarrier* dan untuk mencegah ICI dan ISI. Sinyal yang dikirimkan melewati kanal harus berbentuk serial, sehingga sinyal harus dikonversi dari paralel ke dalam bentuk serial.



Gambar 1. Blok diagram Non-uniform Coded-Modulation pada sistem transmisi OFDM

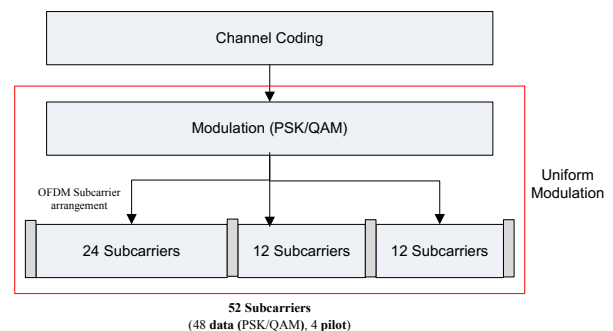
Pada penerima, dilakukan penghapusan *Cyclic Prefix* dan dilakukan proses FFT untuk mengkonversi menjadi *complex symbols*. Kemudian *complex symbols* di proses menggunakan teknik *Non-uniform Coded-Modulation*. Dalam pemodelan ini mengacu pada standar IEEE 802.11a. Untuk lebih jelasnya, spesifikasi sistem OFDM pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi sistem OFDM

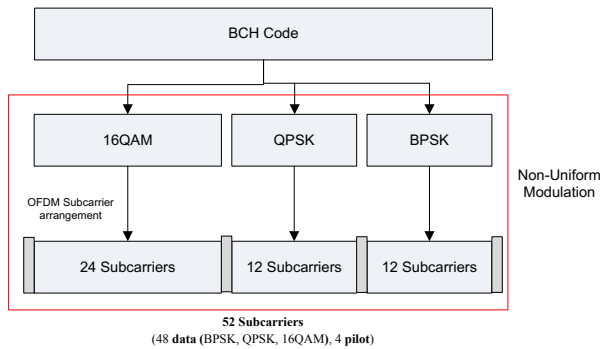
Parameter	Spesifikasi
Modulasi	BPSK, QPSK, 16-QAM
Channel Coding	BCH code (7,4)
Subcarrier	52
Data Subcarrier	48
Pilot Subcarrier	4
FFT size	64

B. Pemodelan untuk Non-uniform Coded-Modulation

Pemodelan sistem *Non-uniform Coded-Modulation* secara sederhana dapat disajikan seperti pada Gambar 2 dan Gambar 3. Pemodelan ini dilakukan dengan memodifikasi susunan *subcarrier* dari standar OFDM IEEE 802.11a. Pada standard tersebut menggunakan 52 *subcarrier*. 52 *subcarrier* tersebut terdiri dari 48 data *subcarrier* dan 4 pilot. Tetapi dalam pemodelan yang diusulkan, 48 data *subcarrier* dibagi menjadi 3 bagian.



Gambar 2. Model yang sudah ada

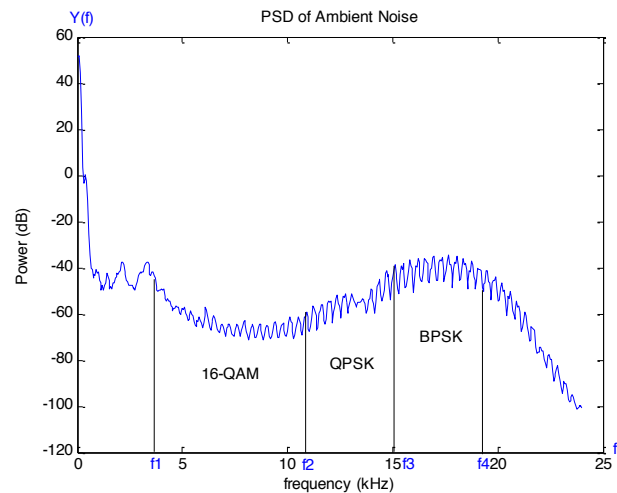


Gambar 3. Pemodelan Non-uniform Coded-Modulation pada Subcarrier OFDM yang diusulkan

Bagian pertama adalah 24 data *subcarrier*, bagian kedua yaitu 12 data *subcarrier*, dan bagian ketiga adalah 12 data *subcarrier*. 24 data *subcarrier* digunakan untuk modulasi 16-QAM, sedangkan 12 data *subcarrier* digunakan untuk modulasi QPSK, dan 12 data *subcarrier* lainnya digunakan untuk modulasi BPSK. Sebelum data ditransmisi menggunakan model *Non-uniform Modulation*, ke 48 data *subcarrier* dilakukan proses pengkodean menggunakan BCH code (7,4).

C. Transmisi OFDM multipath fading dengan noise Gaussian

Pada tahap ini, kami menentukan model saluran yang digunakan dalam simulasi. Jenis saluran yang digunakan untuk menggambarkan kondisi saluran mengacu pada data pengukuran yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya di Pantai Kenjeran [17]. Data *real* kedua diperoleh dari pengukuran yang telah dilakukan di Muara Sungai Mangrove [18]. Secara keseluruhan, data yang diperoleh dari kedua lokasi pengukuran memiliki bentuk *noise* menyerupai distribusi *Gaussian* dan memiliki *spectrum* mendekati *spectrum* putih, atau kita kenal sebagai *White Gaussian Noise*.



Gambar 4. Pembagian modulasi pada level noise yang berbeda

Spectrum dari *ambinet noise* ini memiliki selubung yang cenderung agak datar pada rentang frekuensi tertentu, seperti terlihat pada Gambar 4. Secara lebih detail terlihat bahwa ada kecenderungan nilai *noise* yang relatif rendah pada rentang frekuensi 5 kHz ~ 10 kHz. Pada rentang frekuensi ini nilai level *noise* sekitar -60 dB. Pada rentang frekuensi 10 kHz ~ 15 kHz nilai *noise* juga cenderung lebih tinggi, yaitu mencapai -50 dB. Dan pada rentang frekuensi 15 kHz ~ 20 kHz meningkat lagi sampai -40 dB.

Dari gambaran spektrum yang ada, dapat dilakukan perancangan model *non-uniform modulation*. Pada spektrum rentang frekuensi tinggi akan digunakan untuk modulasi dengan *data rate* rendah tetapi masih dapat diandalkan, sedangkan level spektrum rendah akan digunakan untuk modulasi dengan *data rate* tinggi. Pemilihan modulasi pada level *noise* dilakukan dengan perhitungan SNR dari spektrum *ambient noise*. Dengan menggunakan 52 *subcarrier*, *Bandwidth* yang dimanfaatkan pada pemodelan yaitu sebesar 15,6 kHz. 24 data *subcarrier* menggunakan modulasi 16QAM dengan *bandwidth* sebesar 7,2 kHz, *bandwidth* 4,2 kHz digunakan modulasi BPSK dan QPSK dengan 12 data *subcarrier*, dan 4 pilot. Pembagian *bandwidth* tiap modulasi ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada rentang masing-masing *spectral* memiliki luasan yang dapat digunakan untuk menghitung daya *noise*, seperti pada (1).

$$P_{noise} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} Y(f_i) df}{(f_2 - f_1)} \quad (1)$$

Dimana f_1 adalah batas frekuensi terendah, dan f_2 batas frekuensi tertinggi. Sedangkan $Y(f_i)$ adalah level spektrum dari f_1 sampai f_2 . Sehingga masing-masing daerah memiliki daya *noise* berikut:

$$P_{noise(1,2)} = \frac{50,4}{(10,9-3,7)} = 7 \text{ dB}$$

$$P_{noise(2,3)} = \frac{63}{(15,1-10,9)} = 15 \text{ dB}$$

$$P_{noise(3,4)} = \frac{68,8}{(19,3-15,1)} = 16,38 \text{ dB}$$

Penghitungan nilai *signal-to-noise ratio* (SNR), dapat disederhanakan seperti pada (2):

$$SNR = \frac{P_{sinyal}}{P_{noise}} \quad (2)$$

Pada tiap modulasi yang digunakan memiliki daya sinyal rerata masing-masing. Modulasi BPSK dengan daya sinyal sebesar 1, sedangkan modulasi QPSK memiliki daya sinyal sebesar $\sqrt{2}$, dan modulasi 16QAM memiliki daya sinyal sebesar $((2\sqrt{2} + \sqrt{10})/2)$. Sehingga nilai SNR dari masing-masing adalah:

$$SNR_{1,2} = \frac{P_{sinyal(16QAM)}}{P_{noise(1,2)}} = \frac{\log((2\sqrt{2} + \sqrt{10})/10)}{7 \text{ dB}} = -6,52 \text{ dB}$$

$$SNR_{2,3} = \frac{P_{sinyal(QPSK)}}{P_{(2,3)}} = \frac{\log \sqrt{2}}{15 \text{ dB}} = -14,85 \text{ dB}$$

$$SNR_{3,4} = \frac{P_{sinyal(BPSK)}}{P_{noise(3,4)}} = \frac{\log 1}{16,38 \text{ dB}} = -16,38 \text{ dB}$$

Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada spektrum level rendah mempunyai nilai SNR yang paling tinggi dibanding lainnya, yaitu $SNR_{1,2}$. Pada kondisi ini digunakan modulasi dengan *data rate* tinggi yaitu 16QAM. Pada spektrum level tinggi dengan $SNR_{3,4}$ memiliki nilai yang terendah, sehingga

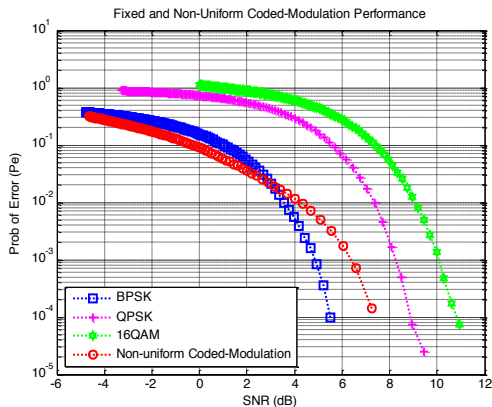
digunakan pada modulasi dengan *data rate* rendah yaitu BPSK. Sedangkan daerah dengan $SNR_{2,3}$ menggunakan modulasi QPSK. Dengan karakteristik kanal akustik bawah air yang bervariasi, penggunaan teknik pengkodean dapat digunakan untuk mencocokkan parameter sistem. Kombinasi kode BCH (7,4) dengan *Non-uniform modulation* [16] diharapkan dapat meningkatkan kinerja sistem. Dimana sistem *Non-uniform Coded-Modulation* dapat memperbaiki kinerja sistem dengan *error* yang lebih baik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Evaluasi kinerja *Non-uniform coded-modulation* pada kanal AWGN

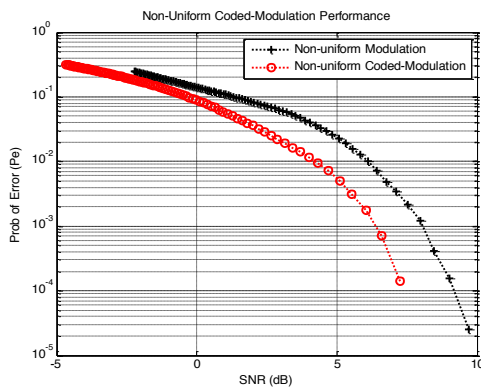
Pada bagian ini dilakukan pengujian sistem yang diusulkan dengan membandingkan kinerjanya dengan *fixed* modulasi dan *Non-uniform modulation* [16]. Pengujian pertama, sistem yang diusulkan dibandingkan dengan *fixed* modulasi yaitu: BPSK, QPSK, dan 16QAM. Pengujian kedua, sistem yang diusulkan dibandingkan kinerjanya dengan *Non-uniform modulation* [16].

Perbandingan modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM, dan *Non-uniform coded-Modulation* pada kanal AWGN. Hasil tersebut menunjukkan bahwa modulasi 16-QAM memiliki SNR terbesar daripada modulasi lainnya sehingga *data rate*-nya tinggi, tetapi juga memiliki *error rate* terbesar. Modulasi BPSK memiliki *data rate* yang kecil, tetapi *error rate*-nya lebih baik daripada QPSK dan 16-QAM. Dengan batas BER yang sama yaitu 0.001, saat menggunakan sistem yang diusulkan yaitu *Non-uniform coded-modulation*, ia memiliki kinerja lebih baik dibanding *fixed* modulasi. *Non-uniform coded-modulation* memiliki *error rate* paling baik. Hal ini karena sistem yang diusulkan menggunakan BCH code sebagai *error* koreksi. Secara lebih jelas hal ini dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan kinerja fixed modulasi dan Non-uniform coded-modulation pada kanal AWGN

Perbandingan kinerja sistem yang diusulkan dengan *Non-uniform modulation* [16]. Hasil menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan memiliki kinerja lebih baik dibandingkan *Non-uniform modulation*. Sistem yang diusulkan memiliki *error rate* yang lebih baik. Dari hasil dapat diamati nilai *coding gain*-nya. *Coding gain* merupakan ukuran dalam perbedaan antara *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) antara sistem tanpa kode dan sistem kode yang diperlukan untuk mencapai tingkat *bit error rate* (BER) yang sama ketika menggunakan *error correction* (BCH code). Pada batas BER 0.001, *Non-uniform Modulation* memiliki SNR sebesar 7,9 dB, sedangkan sistem yang diusulkan memiliki SNR sebesar 6 dB. Sehingga *coding gain* antara *Non-uniform modulation* dengan *Non-uniform coded-modulation* adalah 1,9 dB. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 6.



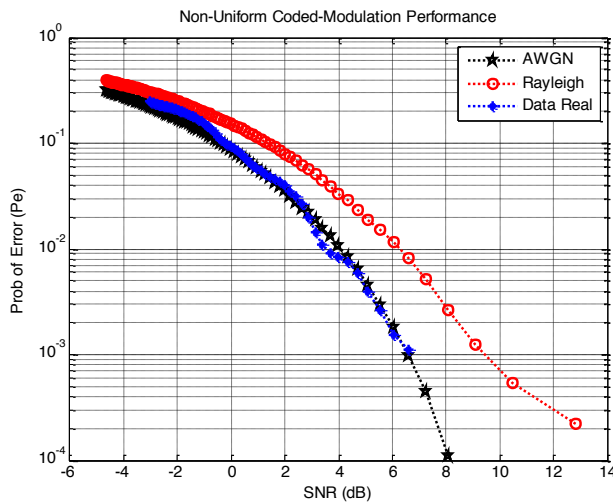
Gambar 6. Kinerja Non-uniform coded-modulation pada kanal AWGN

Sistem yang diusulkan membutuhkan daya kecil untuk mempertahankan nilai *error rate* rendah yang dibuktikan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Untuk mempertahankan nilai *error rate* sebesar 0.001, modulasi BPSK, QPSK, dan 16-QAM membutuhkan daya sebesar masing-masing yaitu: 5 dB, 8,5 dB, dan 10,3 dB. Pada sistem *Non-uniform modulation* membutuhkan daya sebesar 7,9 dB, tetapi sistem yang diusulkan hanya membutuhkan daya sebesar 6 dB. Untuk modulasi BPSK memiliki daya yang rendah daripada sistem yang diusulkan, tetapi *Non-uniform coded-modulation* memiliki *error rate* yang lebih kecil dibanding modulasi BPSK. Sehingga *Non-uniform coded-modulation* dapat digunakan sebagai solusi untuk komunikasi bawah air pada kondisi *White Gaussian Noise* [17].

B. Evaluasi kinerja Non-uniform coded-modulation dengan Data Real

Pengujian yang dilakukan selanjutnya adalah pemodelan *Non-uniform coded-modulation* untuk batasan *threshold* BER 0,001 yang menggunakan data *real* dari pengukuran. Data *real* yang digunakan adalah data suara *noise* hasil pengukuran di daerah perairan dangkal Mangrove, Surabaya [18].

Perbandingan hasil simulasi pada kanal dengan *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), *Rayleigh*, dan data *real* pengukuran. Pencocokkan data *real* pengukuran memiliki hasil yang sama dengan simulasi pada *Gaussian noise*. Hasilnya menunjukkan bahwa, pemodelan yang diterapkan di saluran akustik bawah air di Muara Mangrove memiliki kinerja yang baik, seperti pengujian yang dilakukan pada simulasi di kanal AWGN. Sistem transmisi pada saluran AWGN mewakili kondisi saluran akustik bawah air di Muara Mangrove, memiliki kinerja dengan daya yang rendah untuk mencapai *error rate* 0.001. Secara lebih detail, hal ini dapat dilihat seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Pengujian Non-uniform coded-modulation dengan data real

4. KESIMPULAN

Evaluasi kinerja *Non-uniform Coded-Modulation* pada sistem transmisi OFDM pada saluran akustik bawah air tealah disajikan pada paper ini. Analisis dilakukan dalam hal *bit error rate* (BER). Batas BER yang digunakan sebesar 0.001. Sistem *Non-uniform coded-modulation* yang diusulkan memiliki kinerja yang lebih baik dibanding *Non-uniform modulation* dan *fixed* modulasi yaitu: BPSK, QPSK, dan 16QAM. *Non-uniform coded-modulation* memiliki *error rate* lebih kecil. Daya yang dibutuhkan kecil untuk mencapai *error rate* sebesar 0.001. Pada modulasi BPSK, QPSK, 16-QAM, dan *Non-uniform modulation* membutuhkan daya sebesar: 5 dB, 8,5 dB, 10,3 dB, dan 7,9 dB. Sedangkan *Non-uniform coded-modulation* membutuhkan daya sebesar 6 dB. Selain itu, dilakukan analisis dalam hal *coding gain*, antara sistem yang diusulkan dan *Non-uniform modulation* memiliki *coding gain* sebesar 1,9 dB.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kami ucapkan kepada semua pihak yang telah membantu penelitian ini terutama Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya di bawah Kementerian Riset, Teknologi, dan

Pendidikan Tinggi Indonesia melalui Program Beasiswa Fresh Graduate.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Chitre, S. Shahabudeen and M. Stojanovic, "Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges," *Marine Technology Society Journal*, vol. 42, pp. 103-116, 2008.
- [2] Y. Labrador, M. Karimi, D. Pan and J. Miller, "Modulation and Error Correction in the Underwater Acoustic Communication Channel," *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, vol. 9, no. 7, pp. 123-130, 2009.
- [3] T. H. E. A. B. B. and J. C. P. , "Communication over Doppler spread channels. Part I: Channel and receiver presentation," in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 62-71, 2000.
- [4] M. Stojanovic, "Underwater acoustic communications: Design considerations on the physical layer," dalam *Proc. IEEE/IFIP 5th Annu. Conf. Wireless On Demand Netw. Syst. Services*, Garmisch-Partenkirchen, 2008.
- [5] I.-P. A. I. Kusuma, "Aplikasi Metode Passive Time Reversal Mirror Untuk Mengurangi Pengaruh Multipath Pada Komunikasi Akustik Bawah Air," *JURNAL INOVTEK POLBENG*, vol. 07, no. 1, pp. 1-9, 2017.
- [6] I.-P. I. K. Kusuma and M. Margareta Z.B, "Pengaruh Gerakan Transducer terhadap Kualitas Sinyal Akustik Bawah Air dengan Pendekatan Simulasi," *JURNAL INOVTEK POLBENG*, vol. 08, no. 2, pp. 158-167, 2018.
- [7] B. Li, J. Huang, S. Zhou, K. Ball and M. Stojanovic, "MIMO-OFDM for High-Rate Underwater Acoustic Communications," in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 34, no. 4, pp.

- 634-644, 2009.
- [8] M. Stojanovic, "Low Complexity OFDM Detector for Underwater Acoustic Channels," *dalam OCEANS 2006*, Boston, 2006.
- [9] L. Wan, H. Zhou, X. Xu, Y. Huang, S. Zhou and Z. Shi, "Adaptive Modulation and Coding for Underwater Acoustic OFDM," *dalam IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 40, no. 2, pp. 327-336, 2015.
- [10] M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, p. 84-89, 2009.
- [11] A. Radošević, R. Ahmed, T. M. Duman and J. G. Proakis, "Adaptive OFDM Modulation for Underwater Acoustic Communications: Design Considerations and Experimental Results," *in IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, no. 2, pp. 357-370, 2014.
- [12] A. Radošević, T. M. Duman, J. G. Proakis and M. Stojanovic, "Channel prediction for adaptive modulation in underwater acoustic communications," *dalam OCEANS 2011 IEEE - Spain*, Santander, 2011.
- [13] T. B. Santoso, Wirawan and G. Hendrantoro, "Image transmission with OFDM technique in underwater acoustic environment," *dalam 012 7th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*, Bali, 2012.
- [14] S. S. Sarnin, N. F. Nairn and W. N. S. W. Muhamad, "Performance evaluation of phase shift keying modulation technique using BCH code, Cyclic code and Hamming code through AWGN channel model in communication system," *dalam The 3rd International Conference on Information Sciences and Interaction Sciences*, Chengdu, 2010.
- [15] K. M. S. Soyjaudah and B. Rajkumarsingh, "Adaptive coding and modulation using Reed Solomon codes for Rayleigh fading channels," *dalam EUROCON'2001. International Conference on Trends in Communications. Technical Program, Proceedings (Cat. No.01EX439)*, Bratislava, 2001.
- [16] S. A. Wulandari, T. B. Santoso and I.-G. P. Astawa, "Performance Evaluation of Non-uniform Modulation of OFDM Subcarrier in the Underwater Acoustic Environment," *dalam 2018 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*, Bali, 2018.
- [17] T. B. Santoso, E. Widjiati, Wirawan and G. Hendran, "Ambient noise measurement and characterization of underwater acoustic channel in Surabaya bay," *dalam 2015 IEEE Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob)*, Bandung, 2015.
- [18] S. Adzhani, H. Mahmudah and T.B Santoso, "Time-Frequency Analysis of Underwater Ambient Noise of Mangrove Estuary," *dalam International Electronics Symposium (IES)*, Bali, 2016.