

Implementasi skema pengacakan *subcarrier* OFDM dengan algoritma RSA pada NI-USRP

Nihayatus Sa'adah¹, I Gede Puja Astawa², Amang Sudarsono³

e-mail: nihayatus@pens.ac.id¹, puja@pens.ac.id², amang@pens.ac.id³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Telekomunikasi, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 12 September 2022

Direvisi 12 Oktober 2022

Diterbitkan 28 Oktober 2022

Kata kunci:

OFDM
Pengacakan Subcarrier
RSA
USRP

ABSTRAK

Keamanan jaringan nirkabel merupakan salah satu hal terpenting dalam sistem komunikasi. Karena sinyal dikirim dari pengirim melalui saluran nirkabel, tidak hanya penerima yang sah, tetapi juga penyadap dapat menangkap dan menyimpan sinyal informasi dengan mudah. Penelitian ini mengeksplorasi skema keamanan komunikasi nirkabel dimana skema yang digunakan adalah pengacakan subcarrier. Pemancar dan penerima harus disinkronkan untuk mengembalikan subcarrier ke posisi semula. Sistem ini menggunakan algoritma RSA sebagai sinkronisasi. Teknologi keamanan pengacakan subcarrier diimplementasikan pada sistem OFDM. Sistem OFDM diimplementasikan menggunakan perangkat USRP. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini membuktikan bahwa teknik keamanan yang digunakan tidak menurunkan kinerja sistem, bahkan dapat mengurangi jumlah kesalahan bit akibat teknik sinkronisasi. Dengan teknik sinkronisasi algoritma RSA, dari jarak pengujian 1 meter, 2 meter, dan 5 meter. Pada jarak 1 meter didapatkan hasil terbaik dengan penurunan error bit dari 19,04% menjadi 0% pada 32-QAM dan penurunan error bit dari 28,57% menjadi 4,76% pada 64-QAM.

ABSTRACT

Wireless network security is one of the essential things in communication systems. Since the signal is sent from the sender through a wireless channel, the legitimate receiver and eavesdropper can easily capture and store signal information. This study explores a wireless communication security scheme where the scheme used is subcarrier randomization. The transmitter and receiver must be synchronized to return the subcarrier to its original position. This system uses the RSA algorithm as synchronization. Subcarrier randomization security is implemented in OFDM system. OFDM system is implemented using USRP. The results from this study prove that security techniques don't reduce system performance, and can even reduce the number of errors due to synchronization techniques with RSA synchronization technique, with 1meter, 2meters, and 5meters experiments. At 1meter distance is the best result with bit error drop from 19.04% to 0% on 32-QAM and a bit error drop from 28.57% to 4.76% on 64-QAM.

Keywords:

OFDM
RSA
Subcarrier Randomization
USRP

Penulis Korespondensi:

Nihayatus Sa'adah,
Jurusan Teknik Telekomunikasi,
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya,
Jl. Raya ITS - Kampus PENS, Sukolilo, Surabaya, Indonesia.
Email: nihayatus@pens.ac.id

1. PENDAHULUAN

Sistem komunikasi wireless mengalami banyak scattering yang menyebabkan sinyal mengalami multipath fading, sehingga sinyal yang dikirimkan mengalami gangguan oleh kanal yang bersifat frequency selective fading, berupa intersymbol interferences (ISI). Dengan teknik OFDM sifat kanal frequency selective fading akan diubah menjadi kanal yang bersifat flat fading oleh transmisi multicarrier [1]. Abirami M, Gandhiraj R, Soman K P melakukan penelitian tentang implementasi OFDM menggunakan Universal Software Peripheral Radio (USRP) secara real time dengan Software Defined Radio (SDR) [2]. Dengan adanya sistem SDR, membuat sebuah sistem komunikasi nirkabel menjadi lebih fleksibel sehingga memudahkan para mahasiswa maupun peneliti untuk mengembangkan metode baru. Implementasi sistem OFDM menggunakan 1 antena pengirim dan 1 antena penerima atau bisa disebut dengan sistem SISO (Single Input Single Output).

Karena sifat broadcast pada propagasi radio, transmisi data dapat dengan mudah diserang oleh attacker untuk tujuan intersepsi. Sistem komunikasi membutuhkan teknik keamanan untuk melindungi data yang ditransmisikan [3]. Keamanan lapisan fisik adalah teknik baru yang dapat mencegah penyadapan dengan memanfaatkan karakteristik saluran nirkabel, seperti *multipath fading* untuk meningkatkan keamanan komunikasi terhadap potensi penyadapan [4]. Prinsip dasar keamanan lapisan fisik adalah untuk memanfaatkan keacakan dan keragaman saluran nirkabel. Sistem keamanan lapisan fisik muncul sebagai solusi untuk mengamankan sistem komunikasi nirkabel [5][6]. Rizky, I. G. Puja, Amang telah meneliti metode keamanan pada sistem MIMO-OFDM [7]. Metode keamanan yang digunakan dalam penelitian ini memanfaatkan subcarrier yang ada pada sistem OFDM. Setelah penambahan zero padding disisipkan fake subcarrier untuk meningkatkan tingkat keamanan sistem. Output GLSFR merepresentasikan lokasi fake subcarrier, dimana lokasi fake subcarrier selalu berpindah posisi setiap pengiriman paket. Pada penelitian ini, sinkronisasi antara pemancar dan penerima dilakukan secara manual sehingga menyebabkan sistem menjadi kurang efisien.

Algoritma peningkatan keamanan informasi sistem komunikasi dengan *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dicapai dengan menggunakan sistem *discrete-nonlinear Duffing* dengan dynamic chaos. Gagasan utama untuk meningkatkan keamanan informasi didasarkan pada pengacakan informasi masukan pada tiga tingkat yakni yang pertama adalah mencampur urutan data, yang kedua mengacak nilai data dan yang terakhir mencampur simbol pada konstelasi plot dari *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Aktivitas setiap level dibuat dengan menggunakan pseudorandom, yang dihasilkan oleh sistem *discrete-nonlinear Duffing* dengan *dynamic chaos* [8]. Dalam penelitian lainnya, empat metode keamanan lapisan fisik pada *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) dievaluasi dan dibandingkan. Keempat metode tersebut adalah *Frequency Domain Interleaving* (FDI), *Time Domain Interleaving* (TDI), *Constellation Rotation* (CR) dan *Masking*. Metode ini didasarkan pada kunci rahasia yang dibagikan antara pemancar dan penerima yang sah untuk memberikan perlindungan terhadap penyadapan. Keempat teknik keamanan diimplementasikan menggunakan simulasi komputer. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa TDI unggul teknik lainnya dalam hal keamanan terhadap serangan penyadapan [9].

Resat [10] menggabungkan metode Alamouti OFDM dengan *signal space diversity* (SSD) untuk memperkuat keamanan lapisan fisik jaringan komunikasi secara signifikan. *Coordinate Interleaving* (CI) pada SSD dilakukan di antara subcarrier OFDM. Metode CI membuat korelasi koefisien antara *subcarrier gains* yang mempengaruhi komponen simbol sama dengan nol. Dalam [11], dua lapisan keamanan fisik teknik untuk multiple-input multiple-output (MIMO)-OFDM menggunakan precoding matrix index (PMI) Pembangkitan kunci rahasia berbasis dengan matriks rotasi dan skema berbasis kuantisasi kanal. Teknik keamanan Artificial Noise (AN) [12] mengeksploitasi derajat kebebasan yang berasal dari cyclic prefix sistem OFDM untuk mengganggu penyadapan. AN ditambahkan dalam transmisi sinyal untuk menurunkan kinerja penyadap tanpa mengganggu penerima yang sah [13]. Penerima yang tidak sah selalu menjadi ancaman bagi transmisi sinyal. Oleh karena itu, keamanan lapisan fisik untuk komunikasi nirkabel OFDM perlu penelitian lebih lanjut.

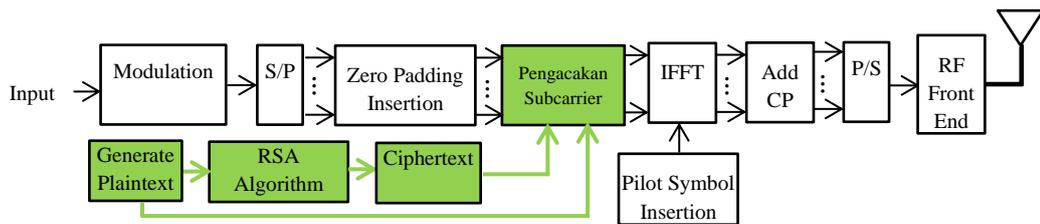
Pada penelitian ini akan dibuat sistem OFDM menggunakan teknik keamanan Pengacakan Subcarrier dengan sinkronisasi algoritma RSA [14] yang akan diimplementasikan pada perangkat USRP. Teknik keamanan yang digunakan memanfaatkan subcarrier yang ada pada teknologi OFDM yaitu metode pengacakan subcarrier. Sistem komunikasi dengan teknologi OFDM dengan metode pengacakan subcarrier membutuhkan sinkronisasi antara pemancar dan penerima. Sinkronisasi antara pemancar dan penerima sangat diperlukan karena keduanya harus mengetahui lokasi subcarrier yang diacak. Ada berbagai teknik sinkronisasi, pada metode keamanan ini menggunakan algoritma RSA untuk sinkronisasi. Dengan algoritma RSA, dapat melakukan sinkronisasi tanpa harus mengirim pola pengacakan bersamaan dengan data informasi. Keamanan algoritma RSA terletak pada tingkat kesulitan untuk memfaktorkan bilangan yang besar menjadi faktor – faktor prima. Pemfaktoran dilakukan untuk memperoleh kunci rahasia. Selama pemfaktoran bilangan besar menjadi faktor- faktor prima belum ditemukan algoritma pemfaktornya, maka selama itu pula keamanan algoritma RSA akan tetap terjamin [15].

2. METODE PENELITIAN

Rancangan sistem yang dibuat pada penelitian ini adalah implementasi teknik keamanan pengacakan lokasi *subcarrier* dengan sinkronisasi algoritma RSA pada sistem komunikasi nirkabel OFDM. Kehandalan dari rancangan sistem ini diuji pada komunikasi real time menggunakan perangkat USRP dengan perangkat lunak LabVIEW.

Perangkat keras USRP memiliki batas kemampuan, salah satu batas kemampuan dari NI-USRP 2920 adalah hanya mampu bekerja di frekuensi 50 MHz hingga 2,2GHz. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis menggunakan nilai tengah dari frekuensi kerja NI-USRP 2920 yaitu pada frekuensi 910 MHz. Batasan lain adalah sampling ADC yang mampu sekitar 400 MS/s sehingga data yang dikirimkan tidak bisa terlalu besar.

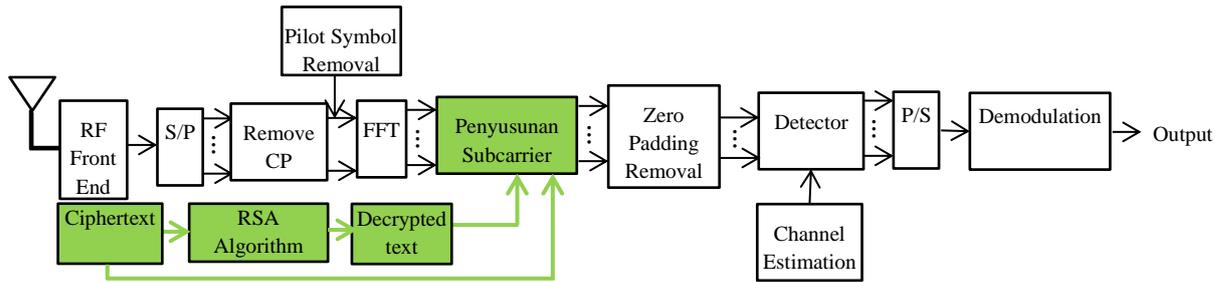
Input data yang dibangkitkan berupa file teks (.txt). Data teks dikonversi menjadi bentuk biner sebelum dimodulasi, modulasi yang digunakan adalah modulasi QAM. Setelah itu simbol yang termodulasi ditambahkan dengan zero padding. Diantara blok penambahan *zero padding* dan IFFT terdapat teknik keamanan pengacakan *subcarrier*, dimana teknik keamanan ini memanfaatkan *subcarrier* pada teknologi OFDM dan algoritma RSA sebagai sinkronisasi. Jumlah *subcarrier* yang digunakan adalah 256 *subcarrier*. Pembangkitan input karakter sebagai plaintext dan dienkripsi menjadi ciphertext. Perubahan lokasi bit plaintext dan ciphertext merepresentasikan perubahan lokasi *subcarrier*. Pada sistem OFDM yang dibangun digunakan teknik estimasi kanal dengan menyisipkan simbol pilot pada simbol OFDM yang dikirim. Penambahan simbol pilot ditempatkan pada bagian tertentu *subcarrier*, Setelah itu sinyal diubah dalam domain waktu pada blok IFFT dan simbol OFDM ditambahkan dengan *cyclic prefix*. Penambahan *cyclic prefix* dilakukan dengan menyalin sebagian bagian belakang simbol dan diletakkan pada bagian depan simbol OFDM. Tujuan penambahan *cyclic prefix* ini untuk menangani pengaruh ISI pada kanal *multipath* untuk masing-masing *subcarrier*. Sinyal diubah menjadi bentuk analog menggunakan DAC yang terdapat pada mainboard USRP dan sinyal dipancarkan oleh antena VERT900. Frekuensi yang digunakan untuk pengiriman sinyal adalah 910 MHz. Alur proses pengolahan sinyal pada sisi pemancar ditunjukkan oleh Gambar 1.



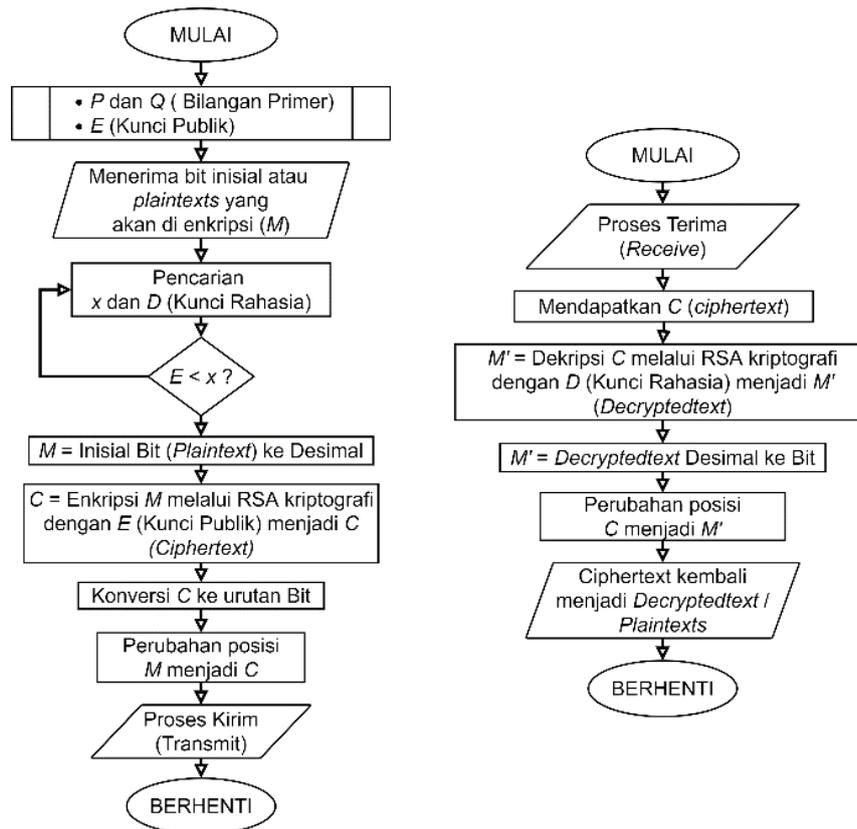
Gambar 1. Blok Diagram OFDM dengan Pengacakan Subcarrier pada Pemancar

Sedangkan pada sisi penerima, sinyal diterima oleh antena VERT900, kemudian sinyal diubah dalam bentuk sinyal digital oleh ADC yang terdapat pada mainboard USRP. Perangkat NI-USRP 2920 dilengkapi dengan DAC dan ADC sehingga dapat berfungsi sebagai pemancar dan penerima. Sinyal analog yang telah dikonversi menjadi sinyal digital, kemudian dihilangkan bagian *cyclic prefix* nya. Selanjutnya sinyal diubah menjadi domain frekuensi menggunakan blok FFT. Pada blok penyusunan *subcarrier*, lokasi *subcarrier* dapat dikembalikan dengan cara mendekrip ciphertext yang dikirimkan oleh pemancar. Perubahan lokasi bit ciphertext dan bit hasil dekripsi menunjukkan pengembalian lokasi *subcarrier* yang telah diacak. Kemudian setelah lokasi *subcarrier* tersusun kembali, zero padding dihilangkan dari simbol OFDM. Simbol pilot dipisahkan dari data untuk digunakan sebagai estimasi kanal. Sinyal diekualisasi menggunakan detektor ZF untuk menghilangkan noise dan fading. Data simbol dari hasil ekualisasi diubah menjadi deretam bit sesuai dengan jenis modulasi. Kemudian deretam bit dikonversi kembali menjadi teks untuk mendapatkan file teks yang dikirim. Alur proses pengolahan sinyal pada sisi penerima ditunjukkan oleh Gambar 2.

Teknik keamanan pengacakan *subcarrier* digunakan untuk mengamankan data yang ditransmisikan. Pada teknik ini terdapat proses pengacakan dan sinkronisasi. Proses sinkronisasi menggunakan algoritma RSA melalui plaintext yang dibangkitkan dan ciphertext yang dihasilkan dari proses enkripsi. Perubahan bit antara plaintext dan ciphertext merepresentasikan perubahan lokasi *subcarrier*. Pengacakan lokasi *subcarrier* menggunakan prinsip array. Berikut adalah flowchart Pengacakan Subcarrier menggunakan Algoritma RSA sebagai sinkronisasi yang ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 2. Blok Diagram OFDM dengan Pengacakan Subcarrier pada Penerima



Gambar 3. Flowchart Pengacakan Subcarrier

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja dari sistem OFDM yang telah diimplementasikan pada USRP. Pada pengujian ini terdapat 2 macam sistem yaitu sistem OFDM tanpa teknik keamanan dan sistem OFDM menggunakan teknik keamanan, dimana teknik keamanan ini memanfaatkan *subcarrier* yang ada pada teknologi OFDM dan membutuhkan sinkronisasi antara pemancar dan penerima. Sinkronisasi antara pemancar dan penerima menggunakan algoritma RSA. Jarak antara sisi pemancar dan penerima adalah 1 meter, 2 meter dan 5 meter. Pengujian pertama adalah pengujian kehandalan sistem OFDM tanpa teknik keamanan dan sistem OFDM menggunakan teknik keamanan dengan berbagai modulasi. Tabel 1 menunjukkan perbandingan teks yang diterima antara sistem OFDM tanpa keamanan dan sistem OFDM dengan keamanan. Dari Tabel 1 terlihat bahwa dengan modulasi 4-QAM, 8-QAM dan 16-QAM pada kedua sistem dapat menerima teks dengan baik. Pada sistem OFDM tanpa keamanan dengan modulasi 32-QAM memiliki error 4 karakter sedangkan sistem OFDM dengan keamanan tidak memiliki error. Saat modulasi 64-QAM digunakan, sistem OFDM tanpa keamanan terdapat error 6 karakter dan sistem OFDM dengan keamanan memiliki error 2 karakter.

Tabel 1. Perbandingan Teks yang Diterima pada Sistem OFDM Tanpa dan dengan Keamanan

Modulasi	Teks yang Diterima (Tanpa Keamanan)	Teks yang Diterima (Dengan Keamanan)
4-QAM	Received Text Selamat Datang di PENS	Received Text Selamat Datang di PENS
8-QAM	Received Text Selamat Datang di PENS	Received Text Selamat Datang di PENS
16-QAM	Received Text Selamat Datang di PENS	Received Text Selamat Datang di PENS
32-QAM	Received Text x elamet Dataig di pENS	Received Text Selamat Datang di PENS
64-QAM	Received Text qelamav!datang di PENS	Received Text Senamat Datang0di PENS

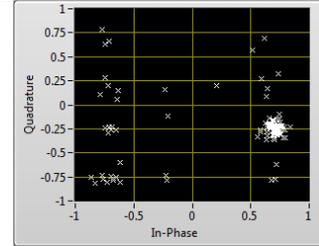
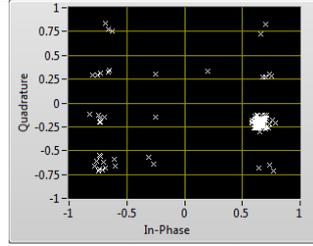
Dari Tabel 1 terlihat bahwa modulasi 4-QAM menghasilkan performansi terbaik dan 64-QAM menghasilkan kinerja yang buruk, hal ini disebabkan semakin besar indeks modulasi maka akan semakin besar kemungkinan terjadinya interferensi antar simbol.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian kehandalan transmisi data pada sistem OFDM tanpa teknik keamanan dan sistem OFDM dengan teknik keamanan dengan perubahan jarak yaitu 2 meter dan 5 meter. Pada pengujian ini akan membandingkan diagram konstelasi yang dihasilkan pada kedua jarak tersebut. Lingkungan pengujian terdapat beberapa peralatan laboratorium sehingga memungkinkan terjadinya *multipath* atau sinyal melalui banyak jalan untuk menuju ke sisi penerima. Adanya *multipath* menyebabkan terjadinya *symbol time offset* (STO) karena adanya *delay* jika sinyal melewati jalur yang lebih panjang dari jalur yang seharusnya sinyal lewati. Sistem OFDM yang dirancang terdapat STO correction sehingga simbol yang *offset* pada penerima dapat diketahui. Tabel 2 menunjukkan hasil pengujian pada sistem OFDM tanpa teknik keamanan dengan perubahan nilai jarak dan berbagai nilai indeks modulasi.

Tabel 2. Diagram konstelasi dengan Perbandingan Jarak pada Sistem OFDM Tanpa Keamanan

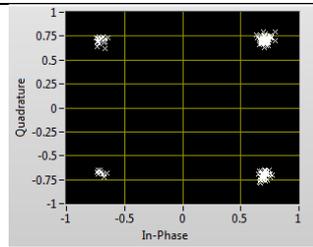
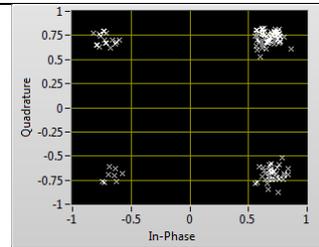
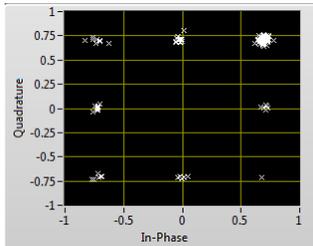
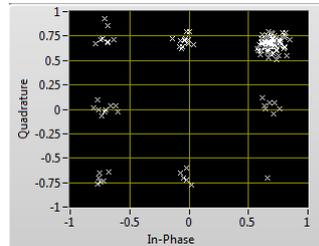
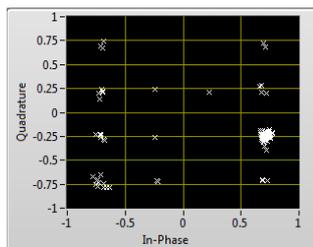
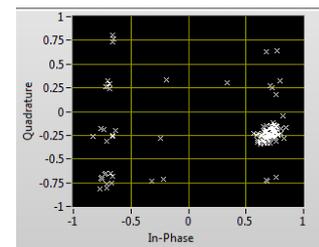
Modulasi	Diagram Konstelasi dengan Jarak 2 m	Diagram Konstelasi dengan Jarak 5 m
4-QAM		
8-QAM		

16-QAM



Selanjutnya adalah pengujian sistem OFDM dengan teknik keamanan dengan perubahan nilai jarak dan berbagai nilai indeks modulasi. Hasil keluaran pengujian ini adalah diagram konstelasi. Hasil diagram konstelasi pada pengujian ini ditunjukkan oleh Tabel 3.

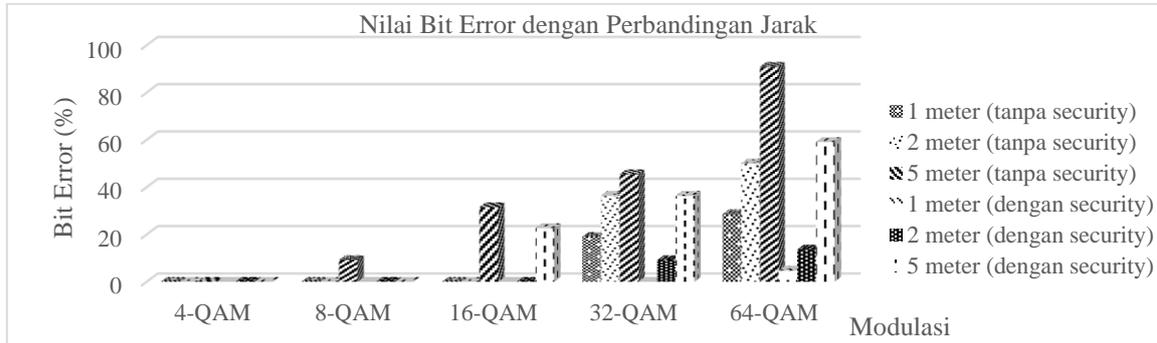
Tabel 3. Diagram konstelasi dengan Perbandingan Jarak pada Sistem OFDM dengan Keamanan

Modulasi	Diagram Konstelasi dengan Jarak 2 m	Diagram Konstelasi dengan Jarak 5 m
4-QAM		
8-QAM		
16-QAM		

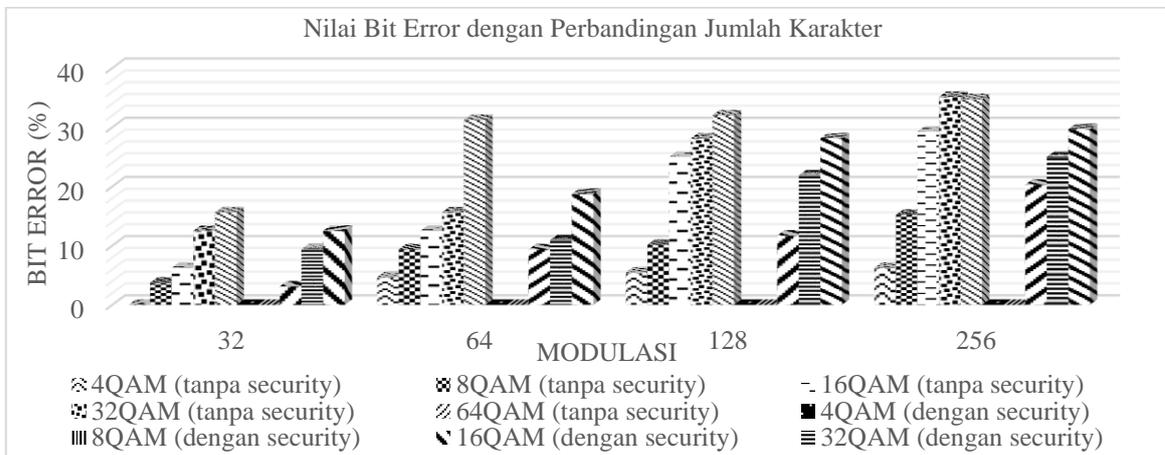
Dari Tabel 3 terlihat bahwa sistem OFDM menggunakan teknik keamanan mampu mengirim dan menerima sinyal dengan baik tanpa menurunkan kinerja sistem. Diagram konstelasi pada jarak 2 meter lebih tertata dibandingkan dengan diagram konstelasi pada jarak 5 meter. Hal ini dikarenakan saat jarak 5 meter, jalur yang dilalui oleh sinyal menjadi lebih banyak, sehingga efek fading mengakibatkan sinyal yang diterima menjadi lemah. Prosentase bit error yang error pada sistem OFDM tanpa dan menggunakan teknik keamanan dengan jarak 1 meter, 2 meter dan 5 meter disajikan dalam bentuk diagram batang pada Gambar 4.

Dapat dilihat dari kedua gambar tersebut bahwa semakin jauh jarak antara pemancar dan penerima maka nilai bit error akan semakin tinggi. Jika indeks modulasi semakin besar maka nilai bit error juga semakin tinggi karena indeks modulasi yang tinggi lebih rentan terhadap noise disebabkan jarak simbol pada diagram konstelasi semakin dekat. Terlihat dari Gambar 4 bahwa nilai bit error pada sistem OFDM dengan teknik keamanan lebih kecil daripada sistem OFDM tanpa teknik keamanan karena penggunaan sinkronisasi algoritma RSA dapat memperbaiki performansi sistem OFDM. Pengujian selanjutnya adalah pengujian sistem

berdasarkan jumlah karakter yang dikirim. Pada pengujian ini variabel jumlah karakter yang digunakan adalah 32, 64, 128 dan 256. Modulasi yang digunakan adalah 4-QAM, 8-QAM, 16-QAM, 32-QAM dan 64-QAM.



Gambar 4. Perbandingan Nilai Prosentase Bit Error pada Sistem OFDM Tanpa dan Dengan Teknik Keamanan



Gambar 5. Nilai Prosentase Bit Error dengan Perubahan Jumlah Karakter pada Sistem OFDM Tanpa dan Dengan Teknik Keamanan

Gambar 5 menunjukkan nilai prosentase bit error dengan perubahan jumlah karakter pada sistem OFDM tanpa dan dengan teknik keamanan pengacakan *subcarrier*. Jumlah karakter yang digunakan yaitu 32, 64, 128, dan 256. Jika karakter yang ditransmisikan semakin banyak, maka PC yang digunakan Pada modulasi 4-QAM menggunakan 32 karakter prosentase error 0%, sedangkan dengan seiring kenaikan jumlah karakter prosentase bit error juga semakin besar. Pada sistem OFDM tanpa teknik keamanan pengacakan *subcarrier* dengan modulasi 64-QAM memiliki prosentase error tertinggi yaitu 34,76% dengan jumlah karakter 256 karena semakin besar indeks modulasi maka sistem OFDM semakin rentan terhadap noise. Pada modulasi 16-QAM, sistem OFDM tanpa teknik keamanan pengacakan *subcarrier* dengan jumlah karakter 32 mempunyai prosentase error bit 6,25%, dan jumlah karakter 256 memiliki prosentase error bit 29,29%. Perbandingan nilai prosentase bit error dengan perubahan jumlah karakter dengan teknik keamanan pengacakan *subcarrier* pada modulasi 4-QAM dan 8-QAM menggunakan 32 karakter hingga 256 karakter prosentase error 0%, hal ini membuktikan bahwa sistem OFDM dengan teknik keamanan pengacakan *subcarrier* dapat menurunkan prosentase bit error karena adanya teknik sinkronisasi menggunakan algoritma RSA. Pada sistem OFDM tanpa teknik keamanan pengacakan *subcarrier* dengan modulasi 64-QAM memiliki prosentase bit error yaitu 29,68% dengan jumlah karakter 256 karena semakin besar indeks modulasi maka sistem OFDM semakin rentan terhadap noise, berbeda halnya dengan 16-QAM dengan jumlah karakter 256 memiliki prosentase error bit 20,31%.

4. KESIMPULAN

Implementasi teknik keamanan pengacakan subcarrier dengan sinkronisasi algoritma RSA pada sistem OFDM menggunakan NI-USRP 2920 menunjukkan bahwa teknik keamanan ini tidak menurunkan kinerja sistem OFDM, bahkan dapat memperbaiki diagram konstelasi dan memperbaiki kinerja sistem karena adanya sinkronisasi algoritma RSA antara pemancar dan penerima. Pada data percobaan pada sub hasil dan pembahasan jarak pengujian 1 meter, 2 meter, dan 5 meter dapat disimpulkan bahwa metode yang digunakan sangat baik pada jarak pengujian 1 meter dimana dapat menurunkan bit error dari 19,04% menjadi 0% pada modulasi 32-QAM dan menurunkan bit error dari 28,57% menjadi 4,76% pada modulasi 64-QAM.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhao, J., Liu, B., Mao, Y., Ullah, R., Ren, J., Chen, S., ... & Shen, J. (2020). High keamanan OFDM-PON with a physical layer encryption based on 4D-hyperchaos and dimension coordination optimization. *Optics Express*, 28(14), 21236-21246.
- [2] Abirami, M., R. Gandhiraj, and K. P. Soman. "Performance analysis of Real time OFDM based communication system using GNU Radio and USRP." *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering* 3.6 (2013).
- [3] Golstein, Sidney J., et al. "Physical Layer Security in an OFDM Time Reversal SISO Communication With Imperfect Channel State Information." *Ieee Access* 10 (2022): 26778-26794.
- [4] Golstein, Sidney, et al. "Physical layer security in frequency-domain time-reversal SISO OFDM communication." *2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. IEEE, 2020.
- [5] Melki, Reem, Hassan N. Noura, and Ali Chehab. "An efficient and secure cipher scheme for MIMO-OFDM systems based on physical layer security." *Telecommunication Systems* 79.1 (2022): 17-32.
- [6] Sultan, Amber, et al. "Dynamic QAM mapping for physical-layer security using digital chaos." *IEEE Access* 6 (2018): 47199-47205.
- [7] R. P. Hudhajanto, I. G. P. Astawa, A. Sudarsono, Covert Communication in MIMO-OFDM System Using Pseudo Random Location of Fake Subcarrier, *EMITTER International Journal of Engineering Technology*, Vol. 4, No. 1, June 2016.
- [8] Gainutdinov and S. Loginov, "Increasing information keamanan of a communication system with OFDM based on a discrete-nonlinear Duffing system with dynamic chaos," 2021 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2021, pp. 249-252, doi: 10.1109/ICOECS52783.2021.9657260.
- [9] T. Nazzal and H. Mukhtar, "Evaluation of Key-Based Physical Layer Keamanan Systems," 2021 4th International Conference on Signal Processing and Information Keamanan (ICSPIS), 2021, pp. 84-87, doi: 10.1109/ICSPIS53734.2021.9652423.
- [10] Reşat, Mustafa Anil, Murat Can Karakoç, and Serdar Özyurt. "Improving physical layer security in Alamouti OFDM systems with subcarrier coordinate interleaving." *IET Communications* 14.16 (2020): 2687-2693.
- [11] J. Classen, M. Schulz, M. Hollick, Practical Covert Channels for WiFi Systems, *IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*, Florence, pp. 209-217, 2015.
- [12] Y. Wu, P. C. Lan, P. C. Yeh, C. H. Lee, and C. M. Cheng, "Practical physical layer security schemes for MIMO-OFDM systems using precoding matrix indices," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 31, no. 9, pp. 1687-1700, Aug. 2013.
- [13] H. Qin, Y. Sun, T. H. Chang, X. Chen, C. Y. Chi, M. Zhao, and J. Wang, "Power allocation and time-domain artificial noise design for wiretap OFDM with discrete inputs," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 6, pp. 2717-2729, June 2013.
- [14] N. Saadah, I. G. P. Astawa, and A. Sudarsono. Confidential data transmission using subcarrier randomization with rsa algorithm for synchronization on mimo-ofdm system. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 8(2):628– 638, 2018
- [15] Sa'Adah, Nihayatus, I. Gede Puja Astawa, and Amang Sudarsono. "Asymmetric cryptography for synchronization on mimo-ofdm system." *2017 International Electronics Symposium on Engineering Technology and Applications (IES-ETA)*. IEEE, 2017.