

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KOMUNIKASI SUARA PADA SISTEM *BI-DIRECTIONAL UNDERWATER VISIBLE LIGHT COMMUNICATION* MENGGUNAKAN LED BIRU

*Design and Implementation of Voice Communication in Bi-Directional Underwater Systems
Visible Light Communication Using Blue LED*

Muhammad Farhan¹, Denny Darlis, S.Si, M.T², Arsyad Ramadhan Darlis, S.T, M.T³

^{1,2} Prodi D3 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Ilmu Terapan, Universitas Telkom

³ Prodi S1 Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional

¹bengs.farhan@gmail.com ²denny.darlis@tass.telkomuniversity.ac.id ³arsyad@itenas.ac.id

Abstrak

Visible Light Communication (VLC) adalah sistem komunikasi untuk mengirimkan sinyal informasi dengan menggunakan modulasi cahaya pada spektrum yang terlihat (400-700 nm). Dengan memanfaatkan cahaya tampak sebagai sistem komunikasi memiliki banyak keunggulan antara lain dari segi kecepatan dan keamanan untuk diaplikasikan, sehingga dapat mengirimkan berbagai jenis informasi seperti pengiriman suara, data digital, gambar dan video.

Underwater Visible Light Communication (UVLC) merupakan perkembangan dari sistem pengiriman informasi menggunakan VLC yang diimplementasikan di bawah air. Pada proyek akhir ini, melakukan perancangan dan implementasi alat pemancar dan penerima komunikasi suara *bi-directional* menggunakan sistem UVLC. Alat pada sistem ini dirancang menggunakan *High Power LED* berwarna biru dan putih untuk mengirimkan sinyal informasi dengan rangkaian *UVLC transmitter* yang telah ditentukan. Sedangkan pada sisi penerima menggunakan photodetector PIN dengan rangkaian *UVLC receiver* yang telah ditentukan untuk menerima sinyal informasi. Melalui implementasi ini, dapat diketahui bahwa sinyal suara yang ditransmisikan melalui cahaya tampak dengan menggunakan sistem UVLC dapat direalisasikan.

Alat pada sistem ini dirancang mampu mentransmisikan sinyal frekuensi berupa *voice audio bi-directional* melalui cahaya tampak di bawah air. Berdasarkan hasil pengujian dengan variasi frekuensi dan variasi jarak yang telah dilakukan didapati bahwa semakin tinggi frekuensi sinyal informasi yang dikirimkan dan semakin jauh jarak pemancar terhadap penerima, menghasilkan tegangan *output* yang semakin rendah. Hal ini berpengaruh terhadap suara yang dihasilkan. Alat ini dirancang agar dapat mempermudah para penyelam untuk melakukan komunikasi di bawah air secara dua arah.

Kata kunci : *Visible Light Communication, Underwater VLC, Voice Transmission, Bi-directional UVLC, LED, Photodiode*

Abstract

Visible Light Communication (VLC) is a communication system for sending information signals by using light modulation in a visible spectrum (400-700 nm). By utilizing visible light as a communication system has many advantages, among others in terms of speed and security to be applied, so it can send various types of information such as sending voice, digital data, images and videos.

Underwater Visible Light Communication (UVLC) is a development of information delivery systems using VLC which is implemented under water. In this final project, designing and implementing *bi-directional voice communication transmitters and receivers* using the UVLC system. The tool on this system is designed using a blue and white *High Power LED* to transmit information signals with the specified UVLC transmitter circuit. Whereas on the receiving side using a photodetector PIN with the UVLC receiver circuit that has been determined to receive information signals. Through this implementation, it can be seen that voice signals transmitted through visible light using the UVLC system can be realized.

The tool in this system is designed to transmit voice signals *bi-directionally* through visible light under water. Based on the results of testing with variations in frequency and distance variations that have been made it is found that the higher the frequency of the information signal sent and the farther the distance of the transmitter from the receiver, resulting in the lower output voltage. This affects the sound produced. This tool is designed to make it easier for divers to conduct underwater communication in both directions.

Keywords : *Visible Light Communication, Underwater VLC, Voice Transmission, Bi-directional UVLC, LED, Photodiode.*

1. Pendahuluan

Seiring berkembangnya teknologi semua pekerjaan dapat dilakukan secara otomatis, mulai dari hal kecil sampai hal besar. Dengan perkembangan teknologi seperti sekarang, manusia dapat melakukan beberapa hal dalam satu waktu, dengan mudah dan cepat, sehingga waktu yang di keluarkan menjadi lebih efisien. Sebelumnya telah dilakukan beberapa perancangan dan penelitian terkait aplikasi dari sistem pengiriman informasi menggunakan *Visible Light Communication* seperti pengiriman audio, gambar dan video.

Visible Light Communication (VLC) adalah sistem komunikasi untuk pengiriman dan penerimaan sinyal informasi dengan menggunakan cahaya tampak sebagai media pembawa informasi [1]. Sampai saat ini, terdapat beberapa penelitian yang telah dipublikasikan dibidang *Visible Light Communication*, diantaranya adalah implementasi *VLC* pada sistem komunikasi, penelitian tersebut menunjukkan bahwa sistem *VLC* dapat diimplementasikan dengan baik pada jarak pengiriman sinyal audio sebesar 2,5 m dengan range frekuensi 600 Hz sampai dengan 45 kHz [2]. Sedangkan pada penelitian lain dilakukan penelitian tentang implementasi *VLC* pada sistem penyiaran musik digital di kafe, membuktikan bahwa bagian *transmitter* dapat melewati frekuensi 20-20.000 Hz [3].

Dengan semakin berkembangnya teknologi ini, maka dilakukan penelitian pengiriman informasi menggunakan sistem komunikasi *VLC* dibawah air. Hasil penelitian tersebut diberi nama *Underwater Visible Light communication (UVLC)*. Sampai saat ini, terdapat beberapa penelitian yang telah dipublikasikan dibidang *Underwater Visible Light Communication*, diantaranya adalah perancangan perangkat pemancar komunikasi suara didalam air berbasis *UVLC*, perancangan tersebut menunjukkan perangkat pemancar menggunakan sistem *UVLC* dengan laser hijau dapat beroperasi optimal sampai jarak 1 km didarat dan didalam air [4]. Sedangkan pada penelitian lain dengan judul *Underwater Visible Light Communication using Maritime Channel (MUVLC)*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa BER hingga 10^{-6} pada jarak 210meter. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat membuktikan bahwa sistem *MUVLC* ini layak digunakan untuk komunikasi dari pantai ke bawah laut [5]. Sedangkan pada tahun 1993 Shuji Nakamura melakukan penelitian terhadap kecerahan dari LED berwarna biru dimana hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa LED biru memiliki kecerahan tinggi dengan menggunakan proses pertumbuhan gallium nitride [6].

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, pada proyek akhir ini akan dilakukan penelitian mengenai "Perancangan dan implementasi komunikasi suara pada sistem *bi-directional Underwater Visible Light Communication* menggunakan LED biru". Penerapan teknologi *bi-directional Underwater Visible Light Communication* kedepannya dapat diterapkan pada penyelam yang ingin melakukan komunikasi suara secara dua arah dibawah air.

2. Dasar Teori

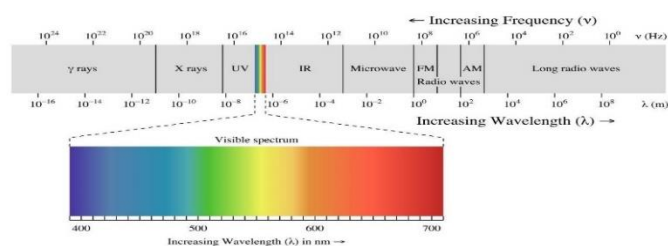
2.1 Optical Wireless Communication

Optical Wireless Communication atau Sistem Komunikasi Cahaya adalah komunikasi yang menggunakan cahaya sebagai media transmisinya pada jarak jauh maupun dekat. Sistem komunikasi yang pada prinsipnya membawa informasi dengan menggunakan modulasi cahaya pada spektrum yang terlihat (375 – 780 nm) yang pada prinsipnya digunakan untuk penerangan.

Modulasi cahaya adalah Teknik modulasi yang menggunakan cahaya berupa pulsa – pulsa cahaya sebagai sinyal pembawa informasi. Berkas cahaya yang digunakan dihasilkan oleh suatu sumber cahaya dapat berupa laser maupun LED. Dibandingkan dengan modulasi konvensional, modulasi cahaya memiliki keunggulan dalam hal ketahanan terhadap derau yang sangat tinggi, karena sinyal tidak dipengaruhi oleh medan elektromagnetik. Dengan menggunakan modulasi cahaya, hal ini akan meningkatkan kualitas dan kuantitas informasi yang dikirim, serta biaya operasi dan pemeliharaan yang lebih ekonomis.

2.2 Komunikasi Cahaya Tampak (*Visible Light Communication*)

Komunikasi cahaya tampak atau *Visible light communication (VLC)* adalah sistem komunikasi data yang dapat membawa informasi dengan modulasi cahaya pada spektrum (780-375 nm). Pada sistem komunikasi ini menggunakan pancaran cahaya LED sebagai pembawa informasi untuk kemudian cahaya yang membawa informasi tersebut diterima oleh detektor cahaya. Dengan menggunakan LED sebagai penerangan akan menghemat daya yang digunakan dan umur pemakaian lebih panjang dibandingkan dengan lampu yang ada saat ini.^[1]



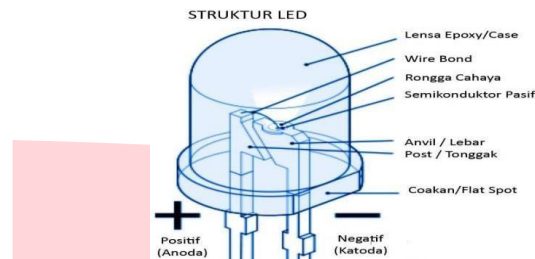
Gambar 2.1 Panjang gelombang cahaya tampak

Dengan adanya teknologi yang memanfaatkan cahaya tampak (visible light) sebagai media komunikasi, seseorang tidak harus membeli sebuah access point untuk menerima data, akan tetapi hanya menggunakan cahaya tampak (visible light) dari lampu saja. Dengan demikian tingkat efisiensi dan mobilitas akan lebih tinggi. Hanya dengan menghidupkan lampu saja dan komunikasi data dapat dilakukan. Dengan teknologi

seperti ini, seseorang dapat menciptakan sebuah komunikasi dengan cara mengirimkan file audio (misal musik, rekaman, dan lainnya) dan video dari satu tempat ke tempat lain dalam sebuah ruangan, yang selama ini dilakukan oleh perangkat infrared atau pun bluetooth, mencetak dokumen dengan jarak yang jauh tanpa menggunakan kabel, dan aplikasi lainnya.

2.2.1 Light Emitting Diode (LED)

Light Emitting Diode (LED) adalah salah satu komponen elektronik yang tidak asing lagi di kehidupan manusia saat ini. LED sudah banyak digunakan diberbagai perangkat elektornik sebagai indicator bahwa sistem sedang dalam proses kerja. Pada dasarnya LED merupakan komponen elektronika berupa diode yang dapat memancarkan cahaya apabila mendapatkan arus listrik. Saat LED diberi pra-tegangan maju (*forward bias*), terjadi rekombinasi antara elektron dan hole di dalam LED sehingga terjadi pelepasan energi dalam bentuk foton-foton cahaya. Efek ini disebut juga *electroluminescence* dan warna yang dihasilkan dari proses tersebut ditentukan dari besarnya energi gap dari semi konduktor yang juga bergantung pada material LED tersebut [7].



Gambar 2.2 Sketsa fisik LED

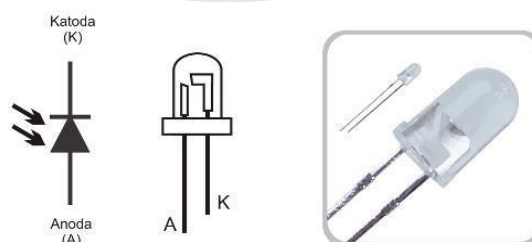
Keanekaragaman warna pada LED tergantung pada panjang gelombang (wavelength) dan senyawa semikonduktor yang dipergunakannya. Saat ini, LED memiliki beberapa variasi warna diantaranya merah, hijau, dan biru. Berikut ini adalah Tabel Senyawa Semikonduktor yang digunakan untuk menghasilkan variasi warna pada LED:

Tabel 2.1 Tabel Senyawa Semikonduktor

| Bahan Semikonduktor | Wavelength | Warna |
|------------------------------------|------------|-------|
| Gallium Arsenide Phosphide (GaAsP) | 630-660 nm | Merah |
| Aluminium Gallium Phospide (AlGaP) | 550-570 nm | Hijau |
| Silicon Carbide (SiC) | 430-505 nm | Biru |

2.2.2 Photodiode

Photodiode dibuat dari semikonduktor dengan bahan yang populer adalah silicon (Si) atau galium arsenida (GaAs), dan yang lain meliputi InSb, InAs, PbSe. Material ini menyerap cahaya dengan karakteristik panjang gelombang mencakup: 2500 Å - 11000 Å untuk silicon, 8000 Å – 20,000 Å untuk GaAs. Photodiode digunakan sebagai penangkap gelombang cahaya yang dipancarkan oleh LED. Besarnya tegangan atau arus listrik yang dihasilkan oleh photodiode tergantung besar kecilnya radiasi yang dipancarkan oleh LED. Sensor Photodiode adalah sebuah diode semikonduktor yang berfungsi sebagai pendeteksi cahaya, bekerja berdasarkan cahaya yang diterima dari LED. Kemasan photodiode terdiri dari sebuah lubang cahaya yang memungkinkan cahaya mengenai bagian sensitif dari photodiode. Semakin besar cahaya yang diterima oleh photodiode, maka semakin kecil nilai resistansinya [8].



Gambar 2.3 Photodiode

Cara kerja photodiode adalah dimana photon diserap oleh atom yang menyebabkan sebuah electron pindah dari level valensi menuju level konduksi. Perubahan energi yang terjadi pada electron adalah E_g , yaitu agar peristiwa ini terjadi, maka energi minimal yang dimiliki oleh photon adalah E_g . Karena energi photon berkaitan dengan frekuensinya (atau panjang gelombang), maka nilai energi gap, E_g ini menentukan respon daerah spektral detektor cahaya. Energi photon, E_p , harus lebih besar atau sama dibandingkan dengan energi gap, E_g .

2.3 Underlight Visible Light Communication (UVLC)

Underwater Visible Light Communication (UVLC) atau sistem komunikasi cahaya tampak di bawah air merupakan teknologi komunikasi yang kompetitif untuk melakukan komunikasi di bawah air. Sistem komunikasi ini dapat membawa informasi dengan modulasi cahaya tampak dibawah air. Sistem *UVLC* ini mentransmisikan sinyal informasi dibawah air dengan mempertimbangkan tinggi gelombang, kecepatan angin, daya serap dan hamburan di bawah air yang masing – masing memiliki koefisien yang berbeda ^[10].

Pengaruh jenis air dalam sistem komunikasi dibagi menjadi empat jenis air, penyerapan air laut murni adalah faktor pembatas utama, nilai *beam* yang rendah membuat cahaya merambat dalam garis lurus. Air laut yang jernih memiliki konsentrasi partikel terlarut yang lebih tinggi sehingga sangat mempengaruhi hamburan cahaya. Air pantai memiliki konsentrasi materi *planktonic*, *detritus*, dan kandungan mineral yang lebih tinggi sehingga sangat mempengaruhi penyerapan dan hamburan. Perairan muara memiliki konsentrasi zat terlarut dan padatan yang sangat tinggi ^[11].

2.3.1 Komunikasi *bi-directional*

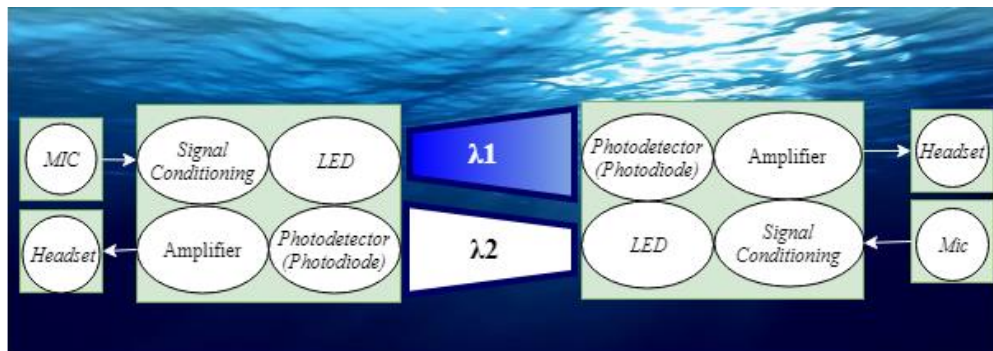
Komunikasi *bi-directional* atau komunikasi 2 arah merupakan jenis komunikasi yang terjadi dengan adanya suatu hubungan timbal balik antara pengirim dan penerima informasi yang disampaikan melalui media perantara suara untuk didengarkan. Komunikasi dua arah memiliki informasi terbatas pada pengirim dan penerima dengan jarak jangkauan yang terbatas.

Syarat komunikasi *bi-directional* diperlukan *transmitter*, media transmisi, dan *receiver*. *ransmitter* berfungsi untuk membangkitkan sinyal informasi suara dan menempatkan sinyal informasi tersebut kedalam media transmisi. Media transmisi berfungsi untuk mengirimkan sinyal informasi yang sudah dibangkitkan dan transmitter menuju *receiver*. *Receiver* berfungsi sebagai penerima sinyal informasi yang sudah dikirimkan oleh media transmisi.

3. Perancangan Dan Prototype Sistem

3.1 Blok Sistem

Prinsip kerja sistem pengirim dan sistem penerima data melalui LED ini adalah input data berupa audio yang berasal dari mic. Secara umum, prinsip kerja perancangan dan implementasi komunikasi suara pada sistem *bi-directional UVLC* menggunakan LED biru dapat digambarkan melalui blok diagram sebagai berikut:



Gambar 3.1 blok diagram sistem Underwater Visible Light Communication

3.2 Implementasi Perangkat dan Sistem

Pada implementasi perangkat digunakan casing yang tepat sesuai dengan yang diharapkan agar air tidak masuk ke perangkat. Sedangkan pada implementasi sistem yang telah dirancang, kemudian dirangkai pada PCB yang telah di *print* sesuai dengan *schematic* yang telah ditentukan. Berikut ini adalah foto hasil implementasi perangkat dan sistem.



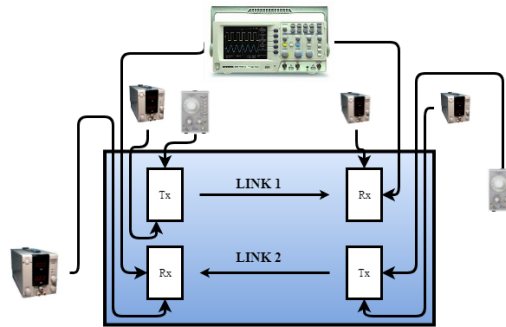
Gambar 3.2 Implementasi Perangkat dan Sistem

4 Hasil dan Pengujian Sistem

4.1 Skema Pengujian

Tujuan dilakukannya pengujian dan analisa sistem pada proyek akhir ini adalah untuk menguji kinerja sistem terhadap kualitas sinyal informasi yang dikirimkan dan diterima dengan jarak dan frekuensi yang bervariasi. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini adalah *Signal Generator*, *Power Supply*, *Osilloscope*, dan *Aquarium*.

4.2. Hasil Pengujian Sistem Dalam Metode *Bi-Directional* di Bawah Air



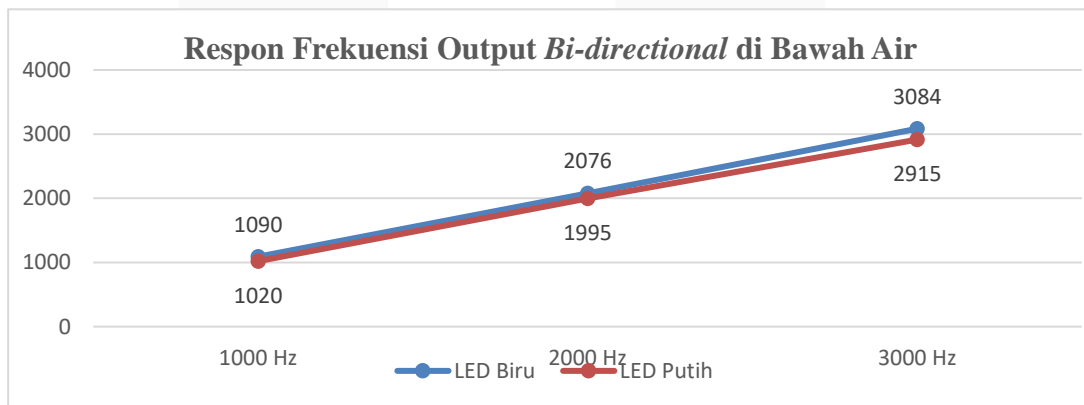
Gambar 4.1 Blok Sistem Pengujian dalam Metode *Bi-directional* di Bawah Air

Pada Gambar 4.1 blok sistem pengujian pada metode *bi-directional* di bawah air, bertujuan untuk menguji kinerja minimal dan maksimal sistem yang telah dirancang dengan membandingkan frekuensi *input* terhadap frekuensi *output* dan frekuensi *input* terhadap tegangan *output* pada perangkat ketika masing – masing sistem mengirimkan informasi dengan kondisi berada di bawah air. Pada pengujian skema ini dilakukan dalam metode *bi-directional* dengan variasi frekuensi 1000Hz – 3000Hz pada tegangan *input* 5V dengan jarak 50cm.



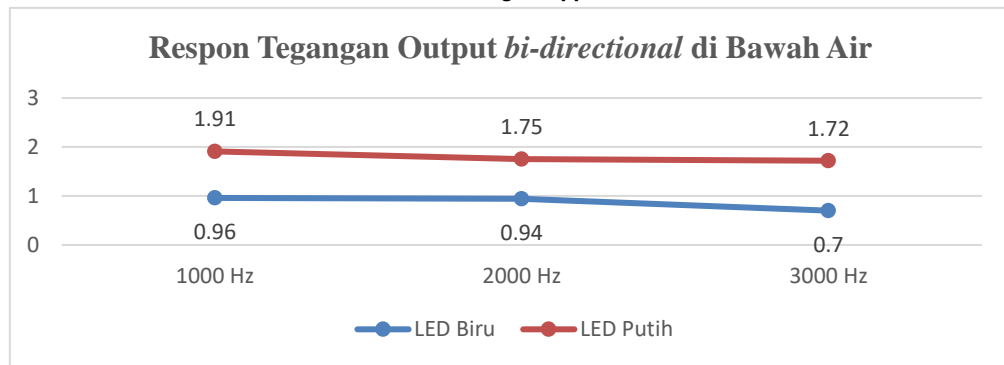
Gambar 4.2 Hasil Pengujian menggunakan osiloskop dalam Metode *Bi-directional* di Bawah air

Pada grafik di bawah ini *line chart* berwarna biru merupakan informasi yang dikirim oleh LED biru, sedangkan *line chart* merah merupakan informasi yang dikirim oleh LED putih.



Gambar 4.3 Respon frekuensi output pada metode *bi-directional* dibawah air

Gambar 4.3 menunjukkan hasil grafik respon frekuensi output pada skema pengujian ini. *Line chart* pada *link 1* tersebut menunjukkan hasil grafik frekuensi *output* yang diterima adalah 1090Hz ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 1000Hz pada jarak 50cm dan frekuensi *output* 3084Hz ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 3000Hz pada jarak 50cm. Sedangkan pada *line chart link 2*, hasil grafik tersebut menunjukkan frekuensi *output* yang diterima 1020Hz ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 1000Hz pada jarak 50cm dan frekuensi *output* 2915Hz ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 3000Hz pada jarak 50cm.



Gambar 4.4 Respon tegangan output bi-directional dibawah air

Gambar 4.4 menunjukkan hasil grafik respon tegangan *output* pada skema pengujian ini. *Line chart* pada *link 1* tersebut menunjukkan hasil grafik tegangan *output* yang diterima adalah 0.9V ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 1000Hz pada jarak 50cm dan tegangan *output* 0.72V ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 3000Hz pada jarak 50cm. Sedangkan pada *line chart link 2*, hasil grafik tersebut menunjukkan tegangan *output* yang diterima 1.91V ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 1000Hz pada jarak 50cm dan tegangan *output* 1.72V ketika sinyal informasi mengirimkan frekuensi 3000Hz pada jarak 50cm.

Berdasarkan Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 hasil grafik pengujian pada skema ini menunjukkan bahwa sistem ini dapat mengirimkan dan menerima frekuensi 1000Hz - 3000Hz dengan jarak 50 cm pada metode *bi-directional* dibawah air. Namun sinyal informasi yang dikirim LED biru memiliki redaman yang lebih tinggi dibandingkan LED putih.

5 Penutup

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perancangan, implementasi dan pengujian pada bab sebelumnya, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil perancangan *casing* LED dan photodiode dengan memodifikasi lampu kolam, membuktikan bahwa air tidak masuk kedalam *casing* ketika dilakukan pengujian di bawah air.
2. Pada hasil pengujian dengan skema yang telah ditentukan membuktikan alat ini mampu mentransmisikan informasi dalam metode *directional* maupun *bi-directional* dengan frekuensi 300Hz – 20000Hz. Frekuensi 300Hz – 3400Hz merupakan karakteristik frekuensi yang dihasilkan dari suara manusia. Sedangkan frekuensi 300Hz – 20000Hz merupakan karakteristik frekuensi yang dapat didengar oleh telinga manusia.
3. Pada skema pengujian dengan variasi jarak membuktikan alat ini mampu mentransmisikan informasi dengan jarak optimal 200cm ketika berada di udara, sedangkan ketika berada di bawah air alat ini mampu mentransmisikan informasi dengan jarak < 200cm.
4. Pancaran LED putih lebih baik untuk mentransmisikan informasi, dikarenakan pada hasil pengujian yang telah dilakukan pada bab sebelumnya menunjukkan tegangan *output* yang diterima oleh pancaran LED putih lebih tinggi dibandingkan LED biru. Semakin rendah tegangan *output* yang diterima oleh receiver menghasilkan redaman yang semakin tinggi hal ini diketahui berdasarkan perhitungan $atenuasi = 20\log(V_{out}/V_{in})$.
5. Pengujian dengan metode *cross talk* menunjukkan bahwa tidak terjadi *cross talk* atau sambungan silang pada sistem ini.

5.2 Saran

Proyek akhir ini sangat memungkinkan untuk dikembangkan, khususnya untuk pengembangan sistem *Underwater Visible Light Communication*. Adapun tindak lanjut pengembangan untuk proyek akhir selanjutnya adalah:

1. Diperlukan *casing* alat yang lebih lebar agar dapat menempatkan rangkaian sistem beserta LED dan photodiode dalam satu *casing*.
2. Diperlukan *mic* dan *headset* yang dapat berfungsi dibawah air.
3. Sumber suara yang dikirim masih berupa analog, sehingga untuk kedepannya akan lebih baik jika sumber suara berupa digital.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D.C. O'Brien., L. Zeng., H. Le-Minh., G. Faulkner., J. W. Walewski., S. Randel. (2008). *Visible Light Communication: Challenges and Possibilities*. IEEE : 978-1-4244-2644-7
- [2] Rinaldi, G.I., Darlis, D., & Putri, H. (2014). *Perancangan Dan Implementasi Visible Light Communication Untuk Komunikasi Suara*. Bandung : Proyek Akhir Telkom University.
- [3] Darlis, D., Darlis, A. R., Abibi, M. Hidayat., 2017. *Implementasi Sistem Penyiaran Musik Digital di Kafe menggunakan Visible Light Communication*. Jurnal Elkomika. 5 (1): 60 – 72.
- [4] Repina, D., Pramana, R., Nugraha, S., *Perancangan Perangkat Pemancar Komunikasi Suara Dalam Air Berbasis Visible Light Communication (VLC)*. Universitas Maritim Raja Ali Haji.
- [5] Darlis, A. R., Cahyadi, W. A., Darlis, D., Chung, Y. H., *Underwater Visible Light Communication Using Maritime Channel*. Departement of Information and Communication Engineering, Pukyong National University.
- [6] Lincon, D. (2014). *How Blue LEDs Work*. Archive The Nature Of Reality.
- [7] Anonymous. (2011). LED – Light Emitting Diode. Di akses pada tanggal 10 Januari 2018 dari halaman <https://Elkatech.blogspot.co.id/2011/03/led-light-emittingdiode.html>
- [8] Ikhwan. (2009). Prinsip Kerja Photodiode. Publics Blog. Di akses pada tanggal 10 januari 2018 dari halaman <http://ikhwanpcr.blogspot.com/2009/12/prinsip-kerja-photodiode.html>.
- [9] Chyntia., (2015). PIN Photodiode vs APD. Cerita Kata. Di akses pada tanggal 10 januuar 2018 dari halaman <https://chysisi.blogspot.co.id/2015/05/pin-photo-diode-vs-apd.html>
- [10] Wang, Z., Wang, Q., Huang, W., Xu, Z., *Visible Light Communication Modulation and Signal Processing*. ISBN 978-1-119-3318-4
- [11] Ghassemlooy, Z., Alves, N. L., Stainslav, Z., Khalighi, M. A., (2017). *Visible Light Communication Theory and Applications*. ISBN: 978-1-4987-6753-8

