

Rancang Bangun Sistem Multipoint Transmitter— Receiver untuk Inspeksi Bawah Air Berbasis Ultrasonik Frekuensi Rendah

Muhammad Edy Hidayat, Agus Indra Gunawan, dan Tri Budi Santoso
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Kampus PENS, Jalan Raya ITS Sukolilo, Surabaya 60111
e-mail: muhammadedyhidayat@gmail.com

Abstrak—Pengujian dan evaluasi tidak merusak merupakan salah satu teknik pengujian yang menguji dan mengevaluasi properti dari material, komponen, atau sistem tanpa menyebabkan adanya kerusakan yang diakibatkan oleh proses pengujian dan evaluasi tersebut. Sensor ultrasonik merupakan salah satu peranti dengan risiko yang sangat minim dalam penggunaannya dan cukup sering digunakan pada proses pengujian dan evaluasi tidak merusak. Ultrasonik frekuensi rendah (<200 kHz) telah digunakan pada proses pengujian dan evaluasi di beberapa bidang keilmuan. Meningkatkan kemampuan uji dari instrumen pengukuran ultrasonik frekuensi rendah namun tetap efisien dan terjangkau merupakan inti dari penelitian ini. Meningkatkan kemampuan dan efisiensi pengujian dengan menambahkan lima titik uji pada satu instrumen pengukuran ultrasonik frekuensi rendah untuk inspeksi bawah air telah dilakukan, dengan merencanakan pembangkit sinyal *trigger* yang mentransmisikan sinyal dengan frekuensi 35 kHz pada tegangan 50 V terbukti dapat memperbaiki kualitas sinyal *echo* yang diterima bila dibandingkan dengan menggunakan sinyal *trigger* yang bersumber langsung dari perangkat *wave generator*. Penggunaan modul *pre-amplifier* pada sisi penerima sinyal *echo* terbukti dapat menaikkan level tegangan sinyal *echo* dan memperbaiki nilai pembacaan sinyal *echo* yang diterima, serta mekanisme kopling sinyal yang dibangun pada penelitian ini terbukti efektif untuk meningkatkan efisiensi pengujian secara multipoint dengan menggunakan satu instrumen pengujian berbasis ultrasonik.

Kata kunci: *sinyal trigger, ultrasonik, frekuensi rendah, sinyal echo, bawah air*

Abstract—Non-destructive testing and evaluation are testing techniques that test and evaluate the properties of a material, component, or system without causing any damage caused by the testing and evaluation process. Ultrasonic sensors are devices with minimal risk in their use and are quite often used in non-destructive testing and evaluation processes. Low frequency ultrasonic (<200kHz) has been used in the testing and evaluation process in several scientific fields. Improving the test capability of low-frequency ultrasonic measurement instruments while remaining efficient and affordable is the core of this research. Increasing test capability and efficiency by adding five test points to a low-frequency ultrasonic measurement instrument for underwater inspections have been carried out by engineering a trigger signal generator that transmits 35kHz signals at 50V voltage proven to improve the quality of the echo signal received when compared to using trigger signal sourced directly from the wave generator device, the use of a pre-amplifier module on the receiver side of the echo signal is proven to be able to increase the voltage level of the echo signal and improve the reading value of the received echo signal, as well as the signal coupling mechanism built in this study, proved to be adequate to increase efficiency multipoint testing using one ultrasonic-based testing instrument.

Keywords: *trigger signal, ultrasonic, low frequency, echo signal, underwater*

Copyright © 2020 Jurnal Rekayasa Elektroika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Pengujian dan evaluasi tidak merusak (*Nondestructive Testing and Evaluation*, NDTE) merupakan salah satu teknik pengujian yang menguji dan mengevaluasi properti dari material, komponen, atau sistem tanpa menyebabkan adanya kerusakan yang diakibatkan oleh proses pengujian dan evaluasi tersebut [1]. Berbeda dengan teknik pengujian dan evaluasi yang mengharuskan pengambilan

sampel dari material uji atau pencampuran suatu bahan ke dalam material uji, teknik NDTE dijalankan tanpa perlu merusak material uji sehingga properti asli dari material uji tetap sama dan tidak berubah dari sebelum hingga setelah pengujian dilakukan. Secara umum dan tidak terbatas, teknik NDTE digunakan pada beberapa bidang, diantaranya: bidang-bidang industri (inspeksi pipa aliran fluida, inspeksi kualitas pengelasan, struktur mekanik bahan), pengolahan makanan (pemeriksaan kontaminasi

bahan atau material asing di dalam makanan), kesehatan (pencitraan tubuh), dan seni (estimasi usia suatu karya seni rupa) [1]-[2].

Ultrasonik adalah gelombang suara yang berada pada frekuensi yang lebih tinggi dari batas atas pendengaran manusia (frekuensi ultrasonik berada di atas 20 kHz hingga beberapa GHz) dan tidak memiliki perbedaan dari segi karakteristik dan properti fisiknya apabila dibandingkan dengan audiosonik (gelombang suara dengan frekuensi yang dapat didengar oleh manusia, 20 Hz – 20 kHz), hanya saja manusia tidak dapat mendengar suara dengan frekuensi ultrasonik [3]. Ultrasonik dapat dimanfaatkan sebagai alat dan metode pengujian dengan menggunakan bantuan sensor ultrasonik yang terbuat dari transduser yang memanfaatkan efek piezoelektrik (maju dan terbalik) dalam pembuatannya [4]. Sensor ultrasonik mempunyai beberapa kelebihan yang menjadikannya cukup efektif untuk digunakan sebagai alat pengujian, di antaranya: mampu untuk digunakan pada kondisi tanpa cahaya, tidak terpengaruh pada warna dan transparansi benda, serta merupakan pilihan ekonomis bila dibandingkan dengan sensor lain yang tersedia dengan kemampuan sejenis [5].

Pada teknik NDTE, penggunaan sensor ultrasonik sebagai alat pengujian sering kali dirujuk dan digunakan [1]-[2]. Hal ini umumnya disebabkan karena sensor ultrasonik mudah untuk didapatkan dan dioperasikan. Penggunaan sensor ultrasonik dalam pengujian dan evaluasi tergolong aman apabila dibandingkan dengan perangkat lain yang memiliki fungsi serupa, sebagai contoh: prosedur pencitraan dan pemindaian objek dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan sensor ultrasonik, pemindaian sinar X, dan pemindaian sinar Gamma, namun dari ketiga alat tersebut hanya sensor ultrasonik yang tidak memiliki resiko (kesehatan dan pengoperasian) serta lebih mudah dalam penggunaannya. Dalam penggunaannya, sensor ultrasonik terbagi ke dalam beberapa kelas yang diklasifikasikan berdasarkan rentang frekuensi kerja sensor ultrasonik tersebut: frekuensi rendah dan frekuensi tinggi. Sensor ultrasonik dengan frekuensi rendah bekerja pada rentang frekuensi di bawah 200 kHz yang umumnya digunakan pada aplikasi kesehatan (untuk meningkatkan dan mempercepat proses naiknya senyawa obat-obatan ke permukaan kulit [6], penyembuhan luka melalui upaya relaksasi permukaan kulit dengan bantuan gelombang ultrasonik frekuensi rendah [7]) dan biologi (peningkatan efisiensi teknik bioproses dan biosensor melalui proses dan teknik kombinasi sonikimia dan bioteknologi [8]), sedangkan untuk sensor ultrasonik dengan frekuensi tinggi bekerja pada rentang frekuensi di atas 10 MHz yang umumnya digunakan dan dijumpai pada aplikasi kecantikan atau dermatologi (digunakan pada proses perbaikan permukaan kulit dengan memanfaatkan panjang gelombang sinyal frekuensi tinggi yang lebih pendek [9]), biologi (inspeksi jaringan *tissue* pada level mikroskopik dengan resolusi kedalaman 100 μm [10]) dan kesehatan (mendeteksi jaringan kanker kulit pada orang dewasa [11]). Rentang dari frekuensi kerja sensor ultrasonik ditentukan oleh beberapa faktor, seperti bidang aplikasi

pengukuran dan jenis serta tipe sensor ultrasonik yang digunakan (umumnya, dalam bidang aplikasi kesehatan yang membutuhkan akurasi tinggi digunakan sensor ultrasonik frekuensi tinggi).

Inspeksi bawah air adalah pengujian yang dilakukan di bawah permukaan air dengan maksud untuk mengetahui kondisi tertentu dari material, objek, atau lingkungan yang ada di bawah permukaan air tanpa perlu mengeluarkannya dari bawah air. Kamera dapat digunakan sebagai alat uji untuk pengujian di bawah air namun pada beberapa kasus tidak dapat diandalkan karena terhambat pada iluminasi yang ada di lingkungan bawah air [12], sensor ultrasonik dapat menjadi solusi untuk inspeksi bawah air karena dalam penggunaannya tidak dipengaruhi oleh kondisi cahaya [5]. Sensor ultrasonik telah cukup sering digunakan di bawah permukaan air, terutama untuk tujuan pendeteksian dan pengukuran kedalaman dari suatu perairan [13]-[14].

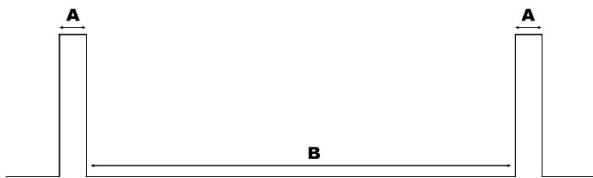
Penelitian ini mengajukan desain rancang bangun sistem *multipoint transmitter – receiver* untuk sensor ultrasonik frekuensi rendah yang digunakan pada inspeksi bawah air. Sistem *multipoint* digunakan untuk meningkatkan akurasi pengujian dengan cara memperbanyak titik-titik uji dari sistem alat uji yang dibangun namun tetap memperhatikan derau yang terjadi sehingga teknik untuk menghindari derau pada gema ultrasonik yang diterima oleh setiap titik sensor juga dibahas dan diajukan pada penelitian ini. Penelitian ini berfokus pada desain untuk sensor ultrasonik frekuensi rendah yang beroperasi secara efektif pada nilai frekuensi kerja 35 kHz untuk penggunaan pengujian di bawah air. Sebelumnya, penggunaan sensor ultrasonik pada frekuensi di sekitar nilai 35 kHz telah digunakan oleh beberapa peneliti lain, seperti yang dilakukan oleh [15] untuk mengukur kecepatan dan impedansi akustik pada tanah liat dan oleh [16] untuk mengkarakterisasi properti larutan garam.

II. STUDI PUSTAKA

Bagian ini menjelaskan tentang teori-teori pendukung yang terkait dengan rancangan desain sistem yang dibuat.

A. Transduser Ultrasonik

Transduser ultrasonik dibuat menggunakan material piezoelektrik yang memanfaatkan efek piezoelektrik maju dalam pembuatan transduser ultrasonik *transmitter* dan efek piezoelektrik mundur dalam pembuatan transduser ultrasonik *receiver* [4]. Bila dilihat dari jumlah transduser yang digunakan dalam sebuah sensor ultrasonik, sensor ultrasonik dapat dibagi menjadi dua: sensor ultrasonik tunggal yang hanya membutuhkan satu transduser untuk keperluan transmisi dan penerimaan sinyal serta sensor ultrasonik berpasangan yang membutuhkan dua transduser yang salah satunya berfungsi sebagai transduser transmisi sinyal dan yang lainnya berfungsi sebagai transduser penerima sinyal. Nilai tegangan dan frekuensi kerja dari setiap transduser ultrasonik berbeda satu sama lain sesuai dengan desain manufaktur dari setiap transduser



Gambar 1. Ilustrasi sinyal trigger transmitter

ultrasonik.

B. Sinyal Trigger Transmitter

Sinyal *trigger transmitter* adalah sinyal *trigger* yang ditransmisikan oleh transduser *transmitter* yang kemudian gemanya (*echo*) akan diterima oleh transduser *receiver*. Sinyal *trigger* dibuat tidak sebagai suatu sinyal kontinu, tetapi sebagai sinyal pulsa dalam periode singkat yang berulang setiap satuan waktu dan jeda antara setiap sinyal *trigger* adalah waktu di mana sinyal *echo* akan diterima [13], [17]. Ilustrasi sinyal *trigger transmitter* ditunjukkan pada Gambar 1.

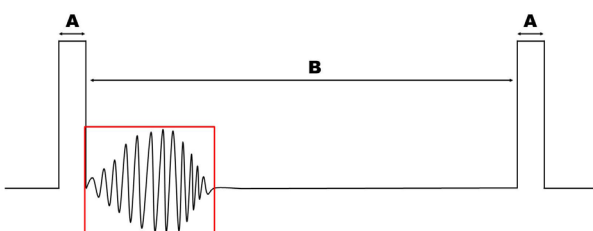
Perhatikan bahwa A adalah sinyal *trigger* dalam bentuk pulsa dengan periode singkat yang berulang setiap satuan waktu dan B adalah jeda antara sinyal *trigger* A yang berulang, lebar atau periode B ditentukan sedemikian rupa sehingga keseluruhan sinyal *echo* dapat masuk sebelum sinyal *trigger* selanjutnya ditransmisikan [13].

C. Sinyal Echo Receiver

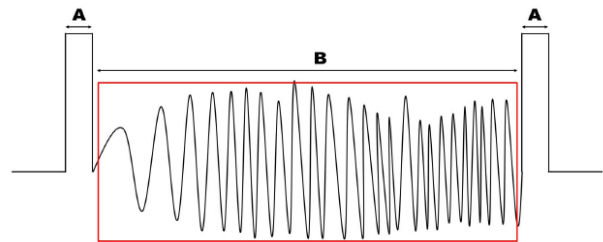
Sinyal *echo receiver* adalah sinyal pantulan atau gema (*echo*) yang diterima oleh transduser *receiver* yang bersumber dari pantulan sinyal *trigger transmitter* yang ditransmisi oleh transduser *transmitter*. Dalam siklus sinyal *trigger – echo* sensor ultrasonik, sinyal *echo* berada pada jeda antara dua sinyal *trigger* dan tidak ada cacat terpotong akibat munculnya sinyal *trigger* baru pada sinyal *echo* yang belum selesai [13].

Ilustrasi sinyal *echo* utuh di antara dua sinyal *trigger* A ditunjukkan pada Gambar 2, perhatikan bahwa seluruh sinyal *echo* (berada di dalam kotak merah) berada pada jeda waktu B dan tidak ada sinyal *echo* yang terpotong atau hilang saat sinyal *trigger* A yang baru ditransmisikan.

Ilustrasi sinyal *echo* yang terpotong diantara dua sinyal *trigger* A ditunjukkan pada Gambar 3, perhatikan bahwa sinyal *echo* yang berada pada jeda waktu B (berada di dalam kotak merah) belum selesai diterima (belum mengecil hingga kembali ke kondisi 0 tanpa sinyal *echo*) tetapi sinyal *trigger* A yang baru kembali ditransmisikan



Gambar 2. Ilustrasi sinyal *echo* utuh



Gambar 3. Ilustrasi sinyal *echo* terpotong

sehingga memotong sinyal *echo* yang diterima.

Sinyal *echo* mengandung beberapa informasi-informasi penting terkait dengan pengujian yang dilakukan, oleh sebab itu sinyal *echo* dalam bentuk utuh sangat penting untuk diperoleh dengan baik dan benar.

III. DESAIN DAN MEKANISME PENGUJIAN

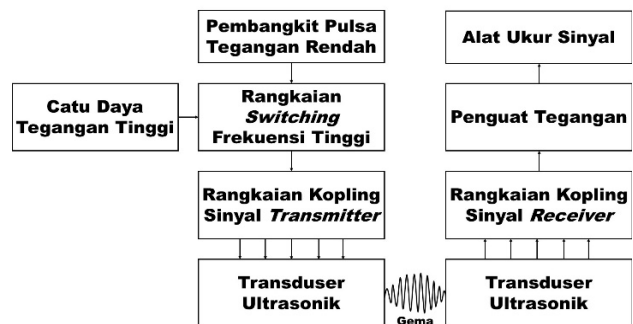
Bagian ini menjelaskan tentang desain yang dibuat dan digunakan pada penelitian ini.

A. Blok Sistem

Blok sistem rangkaian *multipoint transmitter-receiver* pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4. Pembangkit pulsa tegangan rendah berfungsi untuk mengatur komponen *switch* yang ada pada rangkaian *switching* frekuensi tinggi dengan menggunakan pulsa dengan frekuensi 35 kHz dengan jeda setiap pulsa sebesar 100 Hz dan tegangan pulsa sebesar 5 Vpp, pembangkit pulsa tegangan rendah pada penelitian ini menggunakan perangkat *function generator*.

Catu daya tegangan tinggi menghasilkan tegangan searah sebesar 50 V yang digunakan sebagai nilai tegangan pulsa yang dihasilkan oleh rangkaian *switching* frekuensi tinggi, untuk nilai tegangan kerja dari rangkaian *switching* frekuensi tinggi digunakan tegangan catu daya searah sebesar 12 V. Pulsa yang telah dibangkitkan oleh rangkaian *switching* frekuensi tinggi kemudian dihubungkan dengan rangkaian kopling sinyal *transmitter* yang akan mengatur aliran pulsa dari rangkaian *switching* frekuensi tinggi menuju ke transduser ultrasonik *transmitter* yang akan mengirimkan sinyal *trigger* ultrasonik.

Echo ultrasonik yang dihasilkan dari pantulan sinyal *trigger* akan ditangkap oleh seluruh transduser ultrasonik *receiver* yang digunakan, sinyal *echo* tersebut



Gambar 4. Blok sistem rangkaian *multipoint transmitter-receiver*

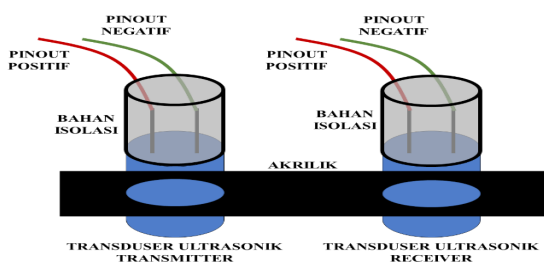


Gambar 5. 16mm waterproof ultrasonic sensor dengan modifikasi

dihubungkan dengan rangkaian kopling sinyal receiver yang mengatur aliran sinyal echo dari transduser ultrasonik receiver menuju ke rangkaian penguat tegangan yang menggunakan penguat pre-amplifier 2 transistor sebagai rangkaian penguatnya. Sinyal echo yang telah dikuatkan kemudian diukur untuk diperoleh informasi dari sinyal echo tersebut.

Transduser ultrasonik yang digunakan sebagai subjek utama pada penelitian ini menggunakan 16mm waterproof ultrasonic sensor yang memiliki frekuensi kerja efektif pada 35 kHz dan tegangan kerja maksimal pada 75 V. Transduser dimodifikasi sedemikian rupa agar dapat digunakan pada lingkungan bawah air dengan menambahkan kabel serabut 2.5 mm pada masing-masing pin out transduser kemudian mengisolasi pin out dengan bahan kedap air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, dua buah transduser yang sama digunakan bersama sebagai pasangan transduser transmitter dan receiver yang digabungkan pada sebuahudukan yang terbuat dari material akrilik, desain dari modifikasi sensor yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 6.

Kedua transduser ultrasonik (transmitter dan receiver) digabungkan secara berdampingan pada sebuah lembaran akrilik dengan bagian permukaan sensor berada di bawah permukaan lembaran akrilik, hal ini bertujuan agar sinyal echo yang dipantulkan terlebih dahulu menyentuh bagian permukaan sensor sebelum menyentuh bagian permukaan lembaran akrilik agar resonansi atau getaran yang terjadi pada permukaan akrilik tidak mempengaruhi getaran pada membran yang ada di dalam transduser ultrasonik. Kabel serabut dihubungkan dengan pin out yang ada di transduser



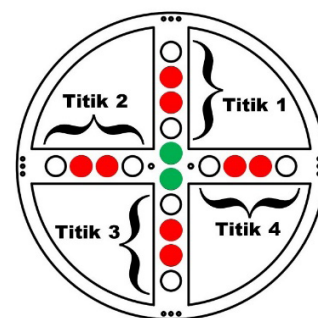
Gambar 6. Desain modifikasi sensor ultrasonik

ultrasonik dan sambungan antara keduanya diisolasi dengan menggunakan bahan kedap air sehingga transduser dapat dengan aman digunakan di bawah permukaan air.

Pembangkit pulsa tegangan rendah yang digunakan pada penelitian ini menggunakan function generator dengan tipe GW Instek AFG-3081 yang diprogram untuk mengeluarkan sinyal picu berupa sinyal sinusoidal single-shot dengan tegangan 5 Vpp dan frekuensi 35 KHz dengan waktu tunda antar sinyal selama 10 ms.

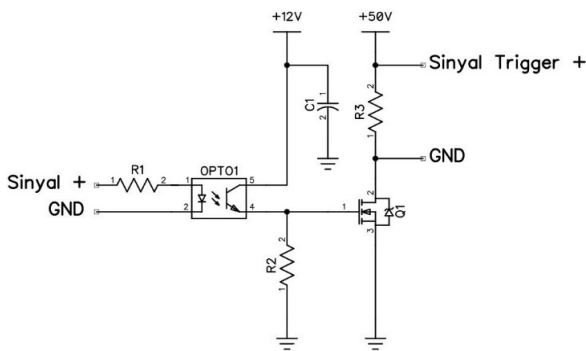
Sinyal pulsa yang dibangkitkan oleh function generator tidak cukup kuat untuk langsung digunakan sebagai sinyal trigger yang akan ditransmisikan oleh transduser ultrasonik, sehingga diperlukan suatu rangkaian yang dapat menaikkan tegangan sinyal pulsa dan tetap memiliki frekuensi sebesar 35 kHz. Rangkaian switching frekuensi tinggi dibuat untuk menaikkan level tegangan trigger dari 5 V menjadi tegangan yang sama dengan catu daya yang digunakan dan memiliki frekuensi yang tetap pada nilai 35 kHz, pada sistem ini digunakan catu daya dengan tegangan keluaran 50 V / 10 A.

Sinyal trigger dengan level tegangan 50 V yang akan ditransmisikan kemudian disalurkan ke rangkaian kopling sinyal transmitter, rangkaian kopling ini berfungsi untuk menggeser sinyal trigger dari satu transduser ultrasonik ke transduser ultrasonik lainnya secara bergantian untuk menghindari derau yang akan muncul ketika lebih dari satu transduser ultrasonik aktif secara bersamaan. Ketika lebih dari satu transduser ultrasonik di dalam sistem yang sama diaktifkan secara bersamaan, maka akan terjadi kerancuan sinyal dimana sinyal echo yang seharusnya ditangkap oleh transduser receiver yang adalah pasangan dari transduser transmitter yang mengirimkan sinyal trigger justru akan ditangkap oleh transduser receiver yang berada pada titik lainnya. Instrumen pengujian yang dibuat pada penelitian ini memiliki lima titik sensor yang menggunakan dua transduser ultrasonik (sepasang transmitter dan receiver) pada setiap titik sensor. Posisi titik-titik sensor pada sistem yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 7 dan jarak antara setiap titik sensor (titik sensor 1 hingga titik sensor 4) menuju titik sensor 5 di pusat bidang adalah sejauh 7 cm. Titik-titik sensor tersebut terpasang pada sebuah bidang lingkaran yang menjadi alat ukur berbasis pengukuran ultrasonik, sehingga sensor tersebut saling terpisah satu sama lain (melakukan pengukuran secara mandiri pada masing-masing sensor) tetapi masih dalam satu kesatuan



Titik Hijau di Bagian Tengah adalah Titik 5

Gambar 7. Titik pemasangan sensor ultrasonik pada alat pengujian



Gambar 8. Rangkaian *switching* frekuensi tinggi

sistem alat yang sama.

Sinyal *trigger* yang telah ditransmisikan oleh transduser *transmitter* akan mengenai permukaan benda atau material uji kemudian akan memantulkan *echo* yang akan ditangkap oleh transduser *receiver* yang merupakan pasangan dari transduser *transmitter* yang mengirimkan sinyal *trigger*. Sistem kopling sinyal *receiver* bertujuan untuk memilih sinyal *echo* hanya dari satu transduser *receiver* untuk kemudian diteruskan ke bagian penguat tegangan.

Penguat tegangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah penguat *pre-amplifier* dua transistor dengan tegangan catu daya yang digunakan adalah sebesar 12 V.

Keluaran dari penguat *pre-amplifier* disambungkan dengan *probe* alat ukur sinyal, pada penelitian ini alat ukur sinyal yang digunakan adalah *Analog Discovery 2* yang sama dijalankan dengan aplikasi LabVIEW 2016.

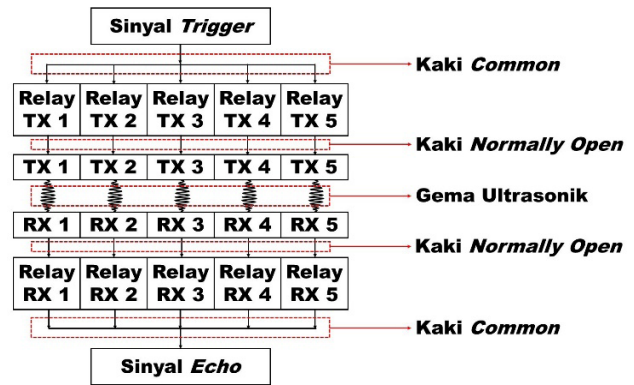
B. Rangkaian *Switching* Frekuensi Tinggi

Rangkaian *switching* frekuensi tinggi yang dibangun pada penelitian ini menggunakan komponen MOSFET IRF620 merek Harris yang berdasarkan dari data yang ada pada lembar *datasheet* memiliki kemampuan maksimal tegangan *drain to source* sebesar 200 V dan memiliki kecepatan *switching* maksimal sebesar 40 ns (25 MHz) untuk *turn on delay* dan sebesar 100 ns (10 MHz) untuk *turn off delay* [18].

Kemampuan MOSFET IRF620 yang digunakan pada penelitian ini mampu menangani keperluan *switching* pada pembangkit sinyal *trigger* ultrasonik frekuensi rendah yang dibangun pada penelitian ini (35 kHz).

Skema rangkaian *switching* frekuensi tinggi yang didesain pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 8, Q1 adalah MOSFET IRF620, OPTO1 yang digunakan adalah TLP621 yang mempunyai kecepatan *switching* sebesar 3 us, nilai R1 adalah 390 Ω, nilai R2 adalah 20 KΩ, dan nilai R3 adalah 1 KΩ, sinyal + pada R1 merupakan sinyal yang bersumber dari *Analog Discovery 2* (sinyal pulsa dengan frekuensi 35 kHz dan tegangan 5 V) dan sinyal *trigger* + pada R3 merupakan sinyal *trigger* yang akan ditransmisikan oleh transduser ultrasonik.

Tegangan 12 V pada optokopler adalah nilai tegangan *gate* yang digunakan untuk mengaktifkan MOSFET IRF620 sedangkan tegangan 50 V pada R3 merupakan



Gambar 9. Skema mekanisme kopling sinyal

tegangan *Drain to Source* yang digunakan pada MOSFET IRF620 dan juga merupakan tegangan *trigger* yang akan ditransmisikan oleh transduser ultrasonik. Catu daya 50 V pada rangkaian dapat digantikan hingga maksimal 200 V dan menyesuaikan dengan tegangan kerja maksimal dari transduser ultrasonik yang digunakan.

R2 pada rangkaian berfungsi sebagai *pull down* yang memutus saklar MOSFET IRF620 pada kondisi sinyal *off*.

C. Mekanisme Kopling Sinyal

Sistem mekanisme kopling sinyal yang dikerjakan pada penelitian ini dibangun dengan menggunakan gabungan dari beberapa komponen relay dengan skema rancangan seperti yang terlihat pada Gambar 9.

Sinyal *trigger* + yang bersumber dari rangkaian *switching* frekuensi tinggi disambungkan dengan kaki *common* pada masing-masing relay *transmitter* (Relay TX) yang terhubung dengan transduser *transmitter* ultrasonik (TX) pada kaki *normally open* dari masing-masing relay *transmitter* yang menjadi pasangannya, hanya kaki positif dari transduser *transmitter* ultrasonik yang terhubung dengan kaki *normally open* pada relay *transmitter* dan kaki negatif dari masing-masing transduser *transmitter* ultrasonik dihubungkan langsung dengan GND (*ground*) pada R3 di rangkaian *switching* frekuensi tinggi.

Kaki *normally open* yang ada pada masing-masing relay *receiver* (Relay RX) dihubungkan dengan kaki positif dari masing-masing transduser *receiver* ultrasonik (RX) yang menjadi pasangannya, kaki *common* dari masing-masing relay *receiver* disambungkan dengan kaki titik pengujian sinyal *echo* (bagian positif pada terminal blok) dan kaki negatif dari masing-masing transduser *receiver* ultrasonik juga dihubungkan dengan kaki titik pengujian sinyal *echo* (bagian negatif pada terminal blok).

Proses kopling sinyal dilakukan dengan mengatur aktivasi dari masing-masing *relay* yang berpasangan antara Relay TX dan Relay RX, sebagai contoh: untuk mendapatkan sinyal *echo* dari titik pengujian 1 maka hanya sinyal *echo* dari transduser *receiver* ultrasonik 1 (RX 1) yang bersumber dari *echo* yang dipantulkan dari sinyal *trigger* yang ditransmisi oleh transduser *transmitter* ultrasonik 1 (TX 1) yang harus diukur oleh alat ukur, hal ini dapat dicapai dengan hanya mengaktifkan *relay-relay*

yang terhubung dengan RX 1 dan TX 1 dan membiarkan *relay-relay* lainnya pada kondisi tidak aktif, dalam contoh ini maka hanya *Relay TX 1* dan *Relay RX 1* yang harus diaktifkan untuk memperoleh informasi pengukuran pada titik 1 tanpa adanya gangguan kerancuan sinyal yang bersumber dari transduser *transmitter* lainnya.

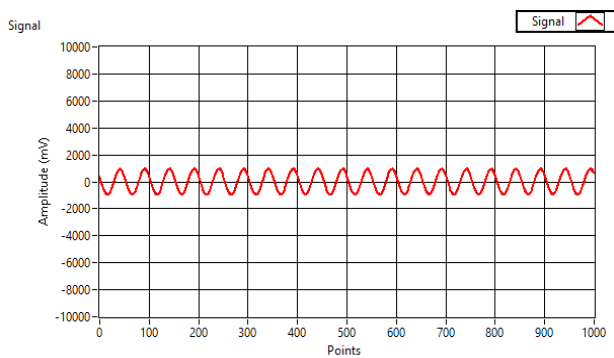
Proses aktivasi *relay* dilakukan dengan menggunakan Arduino Nano yang dikontrol dengan saklar tekan sehingga hanya diperlukan penekanan sesaat pada saklar tekan untuk mengaktifkan relay secara kontinu, digunakan lima saklar tekan yang mewakili masing-masing titik pengujian (satu saklar tekan akan mengaktifkan pasangan *Relay TX* dan *Relay RX* pada titik pengujian yang diwakili oleh saklar tekan tersebut).

D. Penguat Tegangan

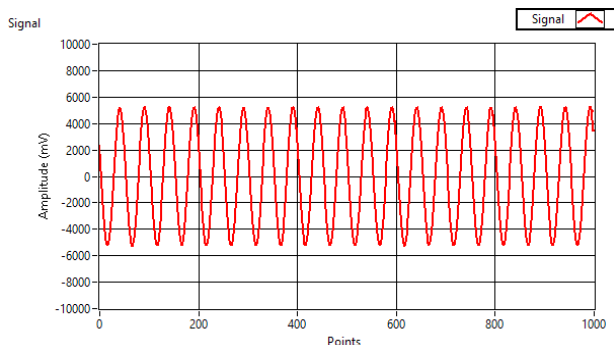
Penguat tegangan pada sistem yang dibangun menerima sinyal masukan yang bersumber dari sinyal *echo* yang diterima oleh transduser *receiver* ultrasonik untuk kemudian dikuatkan level tegangannya dan diukur oleh alat ukur sinyal.

Penguat tegangan yang berfungsi untuk menaikkan level tegangan sinyal *echo* yang diterima oleh transduser *receiver* pada penelitian ini menggunakan modul *pre-amplifier 2 transistor* (LHB-512) yang menggunakan tegangan catu daya sebesar 12 V.

Sebagai sebuah percobaan awal untuk menguji kinerja penguatan dari modul LHB-512, sinyal sinusoidal dengan nilai tegangan sebesar 1 Vpp (Gambar 10) dikuatkan 5 kali dengan menggunakan modul *pre-amplifier* LHB-512 dan diperoleh hasil penguatan berupa sinyal sinusoidal dengan nilai tegangan sebesar 5 Vpp (Gambar 11).



Gambar 10. Sinyal sinusoidal sebelum dikuatkan



Gambar 11. Sinyal sinusoidal setelah dikuatkan



Gambar 12. Modul *pre-amplifier 2 transistor* (LHB-512)

Besarnya nilai penguatan yang dihasilkan oleh modul *pre-amplifier 2 transistor* yang digunakan pada penelitian ini diatur dengan memutar knob potensiometer yang ada pada modul LHB-512 (Gambar 12). Perlu untuk diperhatikan pada saat proses pengujian berlangsung, bahwa besarnya nilai penguatan tidak boleh menyentuh titik nilai saturasi (umumnya senilai dengan tegangan kerja yang digunakan) dari modul LHB-512, hal ini dapat diketahui dengan cara memperhatikan bentuk sinyal keluaran dari modul *pre-amplifier* yang tidak boleh terpotong atau berubah menjadi bentuk sinyal segitiga (berbeda dengan bentuk asli sinyal *echo* yang diterima, sinyal sinusoidal), hal ini perlu untuk diperhatikan guna menjaga informasi-informasi yang ada pada sinyal *echo* yang diterima agar tidak hilang atau rusak.

E. Mekanisme Pengujian

Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan untuk menguji keberhasilan dari sistem yang telah dibangun: rangkaian *switching* frekuensi tinggi sebagai rangkaian penguat sinyal *trigger*, penguat sinyal *echo* dan mekanisme kopling sinyal.

Pada pengujian rangkaian *switching* frekuensi tinggi, akan diuji kemampuan dari rangkaian untuk dapat menghasilkan sinyal *trigger* dengan nilai tegangan sebesar 50 V yang adalah hasil penguatan dari sinyal *trigger* dengan nilai tegangan sebesar 5 V yang bersumber dari *function generator*. Mekanisme pengujian yang dilakukan untuk rangkaian *switching* frekuensi tinggi adalah dengan menjalankan rangkaian dengan menggunakan masukan sinyal *trigger* yang bersumber dari *function generator* kemudian sinyal *trigger* yang dihasilkan oleh rangkaian *switching* frekuensi tinggi akan dibandingkan dengan sinyal *trigger* awal yang bersumber dari *function generator*.

Pada pengujian penguat sinyal *echo*, akan diuji penguatan yang dihasilkan oleh modul *pre-amplifier* LHB-512 untuk menguatkan nilai tegangan sinyal *echo* yang bersumber dari transduser ultrasonik *receiver*. Mekanisme pengujian yang dilakukan adalah dengan menjalankan

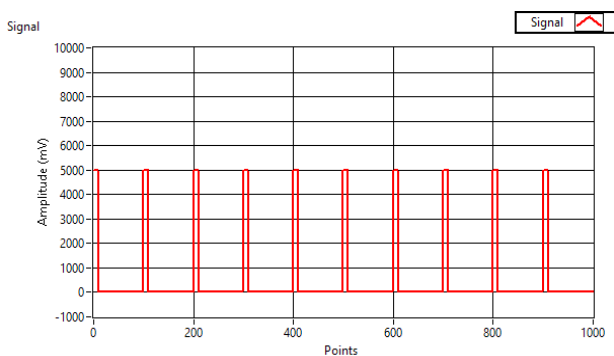
rangkaian penguat sinyal *echo* dan memberikan sinyal *echo* yang bersumber dari transduser ultrasonik *receiver* sebagai sinyal masukan yang akan dikuatkan oleh rangkaian, kemudian sinyal *echo* yang telah dikuatkan akan dibandingkan dengan sinyal *echo* yang belum dikuatkan.

Pada pengujian mekanisme kopling sinyal, akan diuji efektifitas dari mekanisme kopling sinyal yang telah dibuat untuk melakukan penggeseran pengukuran sinyal secara *multipoint*, akan diperhatikan nilai tegangan puncak pada kelima sinyal *echo* yang terukur. Pengujian ini juga sekaligus menguji hasil dari penambahan lima titik sensor pada sistem pengukuran yang dibangun. Mekanisme pengujian yang dilakukan adalah dengan menjalankan sistem pengukuran *multipoint* untuk mendapatkan informasi nilai tegangan puncak dari sinyal *echo* yang terpantul di permukaan dasar akuarium yang telah dikondisikan tidak rata menggunakan pasir yang ditaburkan secara acak, tanpa memindahkan perangkat sistem pengukuran akan diuji mekanisme kopling sinyal apakah dapat memberi informasi nilai tegangan puncak sinyal *echo* dari kelima titik sensor yang dapat mewakili informasi dari topografi yang ada di permukaan dasar akuarium yang tidak rata.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan pengujian pada desain rancang bangun sistem *multipoint transmitter – receiver* untuk inspeksi bawah air berbasis ultrasonik frekuensi rendah dengan mekanisme pengujian yang dijelaskan pada Bab III (Desain dan Mekanisme Pengujian) di bagian Mekanisme Pengujian. Karakteristik sinyal *trigger* yang ditransmisikan oleh transduser ultrasonik *transmitter* dan karakteristik sinyal *echo* yang diterima oleh transduser ultrasonik *receiver* serta mekanisme kopling sinyal yang telah dibuat akan dibahas pada bagian ini.

Pengujian dilakukan pada skala eksperimental dengan menempatkan sistem sensor ultrasonik di dalam akuarium yang berisi air yang tidak disirkulasi, dengan jarak antara permukaan sensor dan dasar akuarium adalah sejauh 8 cm, kecuali untuk pengujian mekanisme kopling sinyal akan ditambahkan pasir ke dasar permukaan akuarium untuk menghasilkan efek permukaan bidang pantul yang tidak rata.



Gambar 13. Sinyal *trigger* sebelum dikuatkan

Tabel 1. Hasil Pengujian Rangkaian Switching Frekuensi Tinggi

Nilai Tegangan Sebelum Dikuatkan	Nilai Tegangan Setelah Dikuatkan	Nilai Tegangan Diharapkan	Keterangan
5 V	50 V	50 V	Tercapai

A. Sinyal *Trigger Transmitter*

Pengujian sinyal *trigger transmitter* menguji kemampuan dari rangkaian *switching* frekuensi tinggi untuk menguatkan nilai tegangan sinyal *trigger* yang digunakan. Sinyal *trigger* yang dihasilkan oleh *function generator* sebagai sinyal yang akan dikuatkan merupakan sinyal *trigger* berbentuk pulsa positif berulang dengan nilai tegangan sebesar 5 V dengan nilai frekuensi sebesar 35 kHz seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13.

Sinyal *trigger* yang bersumber dari *function generator* dikuatkan menggunakan rangkaian *switching* frekuensi tinggi dengan nilai tegangan *switching* yang diharapkan adalah sebesar 50 V, hasil dari percobaan yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 1. Rangkaian *switching* frekuensi tinggi yang diajukan pada penelitian ini mampu untuk menguatkan sinyal *trigger* dari level tegangan 5 V menjadi level tegangan 50 V tanpa adanya distorsi sinyal *trigger* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14.

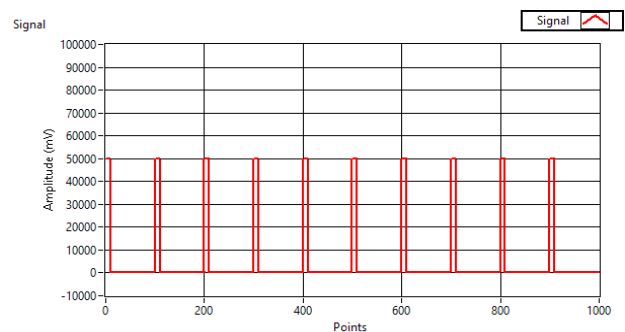
Terlihat pada Gambar 13 dan Gambar 14 bahwa bentuk sinyal *trigger* pada kondisi sebelum dan setelah dikuatkan tidak mengalami distorsi dan hanya mengalami penguatan nilai tegangan dari yang awalnya sebesar 5 V (5000 mV) menjadi 50 V (50000 mV).

Pengujian rangkaian *switching* frekuensi tinggi memiliki hasil yang memuaskan dengan tercapainya nilai tegangan yang diharapkan untuk sinyal *trigger* sebesar 50 V dan tidak terjadi distorsi pada sinyal *trigger* yang dihasilkan.

B. Sinyal *Echo Receiver*

Pengujian sinyal *echo receiver* menguji dan mengukur nilai tegangan puncak yang dihasilkan oleh sinyal *echo* pada kondisi sinyal *trigger* dan sinyal *echo* tidak dikuatkan sama sekali, sinyal *trigger* dikuatkan namun sinyal *echo* tidak dikuatkan, dan sinyal *trigger* dan sinyal *echo* dikuatkan secara bersama-sama.

Tabel 2 menunjukkan hasil dari pengujian masing-



Gambar 14. Sinyal *trigger* setelah dikuatkan

Tabel 2. Hasil Pengujian Penguatan Sinyal Echo

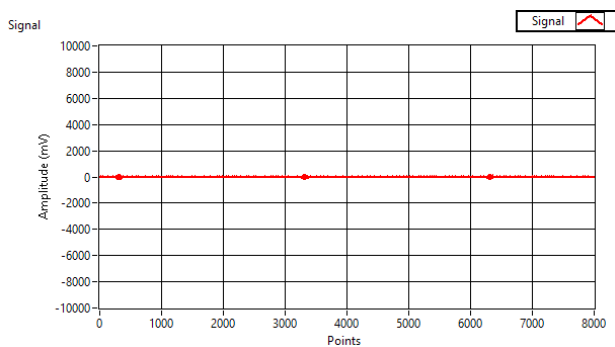
Sinyal Echo	Nilai Tegangan Puncak
Tanpa penguatan sinyal trigger dan sinyal echo	0.15 V
Dengan penguatan sinyal trigger dan tanpa penguatan sinyal echo	0.9 V
Dengan penguatan sinyal trigger dan sinyal echo	3.6 V

masing sinyal *echo* yang telah dilakukan, hasil pengujian berupa hasil pengukuran nilai tegangan puncak dari setiap sinyal *echo* yang diperoleh.

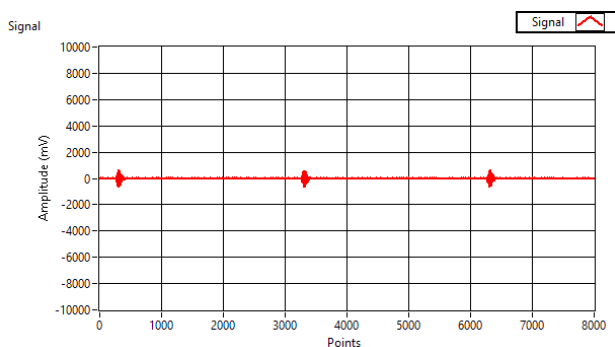
Untuk sinyal *echo* yang tidak dikuatkan dan sinyal *trigger* yang digunakan juga tidak dikuatkan, diperoleh sinyal *echo* dengan nilai tegangan puncak sinyal *echo* sebesar 0.15 V (150 mV) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15.

Sinyal *echo* dengan nilai tegangan puncak sebesar 0.15 V akan sulit untuk diproses langsung oleh mikrokontroler ataupun perangkat pengolah sinyal digital karena nilai tegangannya yang sangat kecil sehingga seringkali dikenali sebagai sinyal derau dan bukan sinyal *echo*. Dapat dikatakan bahwa sinyal *echo* pada Gambar 15 belum cukup kuat nilai tegangannya untuk dapat diproses oleh mikrokontroler atau perangkat pengolah sinyal digital.

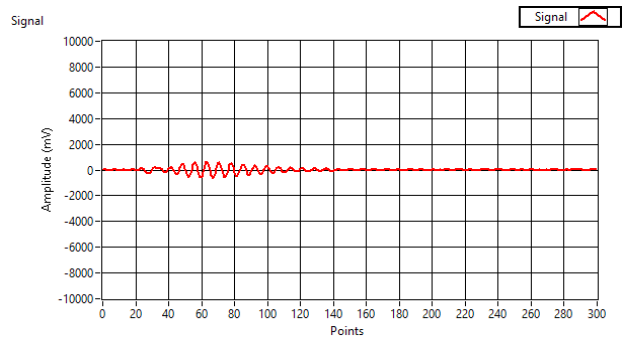
Pengukuran sinyal *echo* kembali dilakukan dengan memodifikasi sinyal *trigger transmitter* ultrasonik yang digunakan menggunakan sinyal *trigger transmitter* hasil dari pengolahan rangkaian *switching* frekuensi tinggi. Sinyal *echo* dengan nilai tegangan sinyal *trigger* sebesar 50 V memberikan nilai hasil pengukuran tegangan puncak sebesar 0.9 V (900 mV) seperti terlihat pada Gambar 16.



Gambar 15. Sinyal *echo* tanpa penguatan *trigger* dan *echo*



Gambar 16. Sinyal *echo* dengan hanya penguatan sinyal *trigger*



Gambar 17. Sinyal *echo* sebelum dikuatkan

Sinyal *echo* dengan nilai tegangan puncak sebesar 0.9 V masih cukup sulit untuk diproses langsung oleh perangkat mikrokontroler ataupun perangkat pengolah sinyal digital tetapi sudah cukup kuat untuk dapat dikuatkan oleh modul penguat sinyal LHB-512. Bentuk fisik sinyal *echo* yang diterima tidak mengalami pemotongan ataupun distorsi akibat dari penggunaan sinyal *trigger* dengan nilai tegangan yang tinggi. Gambar 17 merupakan perbesaran dari salah satu sinyal *echo* yang ada di Gambar 16.

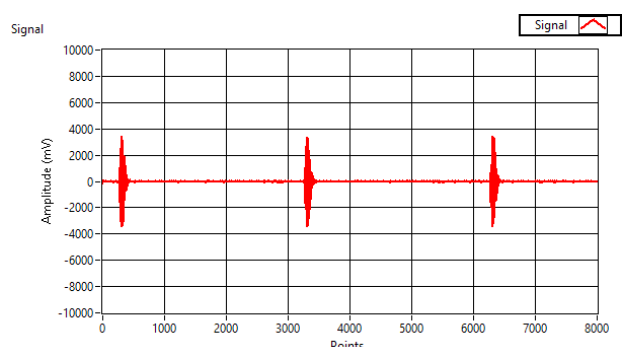
Pengukuran untuk sinyal *echo* kembali dilakukan dengan menggunakan sinyal *trigger* yang telah dikuatkan dan sinyal *echo* yang diperoleh juga dikuatkan dengan menggunakan modul penguat tegangan LHB-512. Sinyal *echo* yang diperoleh memiliki nilai tegangan puncak sebesar 3.6 V (3600 mV) seperti yang terlihat pada Gambar 18.

Sinyal *echo* dengan nilai tegangan puncak sebesar 3.6 V sudah cukup kuat untuk dapat diproses oleh mikrokontroler atau perangkat pengolah sinyal digital (nilai tegangan 3.6 V sedikit lebih besar di atas level tegangan CMOS 3.3 V).

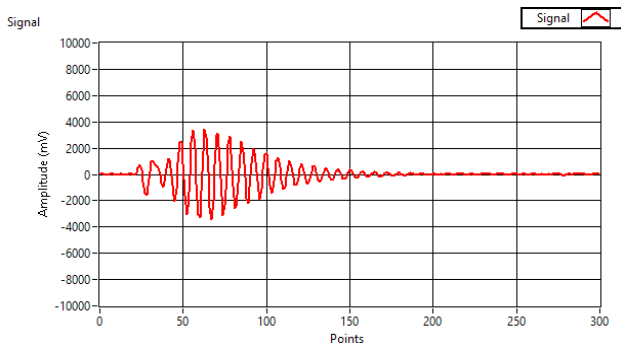
Selain itu, bentuk fisik dari sinyal *echo* yang menggunakan sinyal *trigger* dengan tegangan 50 V dan kemudian sinyal *echo* tersebut dikuatkan hingga 4 kali tidak mengalami distorsi ataupun pemotongan. Gambar 19 merupakan perbesaran dari salah satu sinyal *echo* yang ada pada Gambar 18.

Pengujian dari sinyal *echo receiver* memiliki hasil yang memuaskan dengan didapatnya hasil bahwa kombinasi dari penguatan sinyal *trigger* dan penguatan sinyal *echo* akan memperbaiki dan meningkatkan kualitas akhir dari sinyal *echo* yang diperoleh.

C. Mekanisme Kopling Sinyal



Gambar 18. Sinyal *echo* dengan penguatan *trigger* dan *echo*



Gambar 19. Sinyal *echo* setelah dikuatkan

Pengujian dari mekanisme kopling sinyal menguji dan mengukur kelima sinyal *echo* yang mewakili kelima titik sensor yang ada di perangkat pengukuran, pengukuran dari kelima sinyal *echo* dilakukan tanpa memindahkan posisi perangkat pengukuran dan hanya menggunakan mekanisme kopling sinyal dengan menekan tombol yang mengatur aktivasi dari *relay-relay* yang digunakan.

Sebagai validasi yang membuktikan bahwa terjadi proses pertukaran sinyal *echo*, akan diukur nilai tegangan puncak dari sinyal *echo* yang melakukan proses pengukuran pada permukaan akuarium yang tidak rata (dikondisikan dengan menggunakan pasir yang ditabur secara acak). Terjadinya perubahan nilai tegangan puncak yang terukur pada setiap penekanan tombol pengendali *relay* mengartikan bahwa terjadi pertukaran sinyal *echo* yang diukur.

Sebagai pengujian efektifitas dan peningkatan efisiensi pengukuran dengan menggunakan *multipoint* sensor, kami mensimulasikan pekerjaan pemetaan topografi permukaan dasar dari akuarium secara sederhana. Simulasi yang kami gunakan adalah dengan memanfaatkan nilai dari tegangan puncak yang terukur pada sinyal *echo* dari masing-masing sensor yang ada, topografi dari permukaan dasar akuarium yang ada di bawah sensor dikondisikan tidak rata sehingga secara teoritis nilai tegangan puncak yang terukur tidak akan sama pada masing-masing sensor, semakin tinggi gundukan pasir yang ada di bawah titik sensor (jarak antara sensor dan permukaan dasar semakin dekat) akan memberikan sinyal *echo* yang lebih kuat, dan semakin rendah gundukan pasir yang ada di bawah titik sensor (jarak antara sensor dan permukaan dasar semakin jauh) akan memberikan sinyal *echo* yang lebih lemah.

Hasil dari pengujian yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 3. Terdapat perbedaan nilai tegangan puncak pada setiap sinyal *echo* yang diterima dari hasil

Tabel 3. Hasil Pengujian Mekanisme Kopling Sinyal dan Simulasi Topografi Permukaan Dasar Akuarium

Titik Sensor	Kondisi Permukaan	Nilai Tegangan Puncak
1	Sedang	3.87 V
2	Rendah	3.7 V
3	Rendah	3.75 V
4	Sedang	3.83 V
5	Tinggi	4.1 V

penekanan tombol pengendali *relay*, hasil pengukuran ini membuktikan bahwa mekanisme kopling sinyal yang dibangun berhasil untuk dapat mengatur pergantian sinyal yang masuk ke alat ukur.

Hasil untuk simulasi pengukuran topografi permukaan dasar akuarium juga dapat dilihat pada Tabel 3. Tinggi dari gundukan pasir yang ada di bawah setiap titik sensor diamati dan diukur dengan pengelihat mata normal ke dalam tiga kategori: tinggi, sedang, dan rendah. Hasil dari pengukuran tegangan puncak setiap sinyal *echo* di masing-masing titik sensor memberikan hasil bahwa titik sensor yang mengukur permukaan kategori tinggi memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari titik sensor yang mengukur permukaan kategori sedang dan rendah, begitupun dengan titik sensor yang mengukur permukaan kategori sedang memiliki nilai tegangan puncak yang lebih besar dari titik sensor yang mengukur permukaan kategori rendah namun lebih kecil dari nilai tegangan puncak pada titik sensor yang mengukur permukaan kategori tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan lebih banyak titik sensor pada alat pengukuran (dalam penelitian ini digunakan lima titik sensor) mampu untuk meningkatkan efisiensi dari pengukuran, percobaan ini menguji untuk melakukan pemetaan topografi secara sederhana dan diperoleh hasil yang sesuai dengan kondisi topografi yang ada di permukaan dasar akuarium dengan proses pengukuran yang dilakukan tanpa pemindahan alat ukur, apabila alat ukur yang digunakan hanya memiliki satu titik sensor maka diperlukan proses pemindahan alat ukur secara manual dari satu titik observasi ke titik observasi lainnya untuk mendapatkan hasil yang sama dengan apa yang diperoleh menggunakan alat ukur dengan titik sensor yang lebih banyak.

V. KESIMPULAN

Sistem *multipoint transmitter – receiver* untuk inspeksi bawah air berbasis ultrasonik frekuensi rendah yang terdiri dari sistem penguat sinyal *trigger*, penguat sinyal *echo*, dan mekanisme kopling sinyal telah berhasil dirancang dan diimplementasikan pada penelitian di dalam artikel ini. Sistem penguat sinyal *trigger* yang diwujudkan melalui rangkaian *switching* frekuensi tinggi dengan menggunakan komponen utama IRF620 terbukti mampu untuk menaikkan level tegangan sinyal *trigger* dari yang awalnya sebesar 5 V menjadi sebesar 50 V yang sesuai dengan nilai tegangan catu daya yang digunakan pada rangkaian *switching* frekuensi tinggi. Sistem penguat sinyal *echo* yang dibangun dengan menggunakan modul *pre-amplifier* 2 transistor yang dikombinasikan dengan sinyal *trigger* bertegangan 50 V terbukti mampu untuk menaikkan level tegangan sinyal *echo* dari yang awalnya sebesar 0.15 V menjadi sebesar 3.6 V tanpa adanya distorsi yang terjadi pada sinyal *echo* yang telah dikuatkan. Mekanisme kopling sinyal yang dibangun dari kombinasi beberapa komponen *relay* terbukti dapat mengatur proses pergantian dan pemilihan sinyal *echo* yang akan diukur oleh instrumen pengukuran sinyal *echo* dengan

menggunakan prinsip pergantian aktivasi antar *relay*.

Penggunaan prinsip *multipoint* pada alat ukur terbukti mampu untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengukuran, melalui pengujian simulasi pemetaan topografi yang dilakukan pada penelitian ini didapatkan hasil bahwa dengan menambah jumlah titik sensor akan memperluas area pemetaan yang ada bila dibandingkan apabila hanya menggunakan satu titik sensor yang memerlukan proses pemindahan alat ukur secara manual.

Untuk selanjutnya, penelitian ini dapat dikembangkan pada aplikasi-aplikasi pengukuran bawah air dengan teknik NDTE berbasis ultrasonik yang membutuhkan area cakupan proses penginderaan yang luas atau yang membutuhkan lebih dari satu titik penginderaan.

REFERENSI

- [1] Wikipedia. (View Jul. 2020). Nondestructive Testing [Online]. Available: <https://bit.ly/3fKGzad>.
- [2] A. I. Gunawan. "A study on acoustic impedance microscopy for biological and medical applications", Ph.D Thesis, Toyohashi University of Technology, 2015.
- [3] Wikipedia. (View Jul. 2020). Ultrasound [Online]. Available: <https://bit.ly/2DJ2eQU>.
- [4] A. Murphy and M. M. Nadrljanski et al. (View Jul. 2020). Piezoelectric Effect [Online]. Available: <https://bit.ly/399nE6u>.
- [5] K. Gillespie. (View Sep. 2019) Ultrasonic Sensors: Advantages and Limitations [Online]. Available: <https://bit.ly/2Qrlchy>.
- [6] A. S. Fiorillo, D. Grimaldi, D. Paolino, and S. A. Pullano, "Low-frequency ultrasound in medicine: An in vivo evaluation," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 6, pp.1658-1663, 2012.
- [7] J. Voigt, M. Wendelken, V. Driver, and O. M. Alvarez, "Low-frequency ultrasound (20-40 kHz) as an adjunctive therapy for chronic wound healing," *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, vol.10, no.4, pp.190-199, 2011.
- [8] E. V. Rokhina, P. Lens, and J. Virkutyte, "Low-frequency ultrasound in biotechnology: State of the art," *Trends in Biotechnology*, vol. 27, no. 5, pp.298-306, 2009.
- [9] A. K. Bhatta, U. Keyal, and Y. Lu, "Application of high frequency ultrasound in dermatology," *Discovery Medicine*, pp. 237-242, Dec. 2018.
- [10] J. Mamou, O. Aristizaba, R. Silverman, and J. Ketterling, "A perspective on high-frequency ultrasound for medical applications," *Physics Procedia*, vol. 3, no. 1, pp.289-295, 2010.
- [11] J. Dinnes, J. Bamber, N. Chuchu, and S. Bayliss et al., "High-frequency ultrasound for diagnosing skin Cancer in Adults," *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2018.
- [12] D. Li, L. Xu, and H. Liu., "Detection of uneaten fish food pellets in underwater images for aquaculture," *Aquac. Eng.*, 78, pp.85-94, 2017.
- [13] S. E. Borujeni., "Ultrasonic underwater depth measurement," International Symposium on Underwater Technology, 2002, pp.33-36.
- [14] L. Du, W. Chen, and T. Xie, "Design of underwater ultrasonic distance measurement using in arctic sea ice melting monitoring with high precision," Seventh International Conference on Information Science and Technology, 2017, pp.411-415.
- [15] L. Lusiana, A. I. Gunawan, and B. S. B. Dewantara, "Pengukuran speed dan impedansi akustik pada tanah liat dengan memanfaatkan sinyal echo ultrasonik," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no. 2, hal. 145-156, 2019.
- [16] I. D. Wicaksono, A. I. Gunawan, and B. S. B. Dewantara, "Karakterisasi dari properti larutan garam dengan range finder ultrasonik menggunakan metode transformasi fourier," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 16, no. 2, hal.110-119, 2020.
- [17] T. Yamamura, M. Tanabe, K. Okubo, and N. Tagawa, "A method for improving signal-to-noise ratio of tissue harmonic imaging based on bayesian inference using information of fundamental echoes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, 2012.
- [18] H. Semiconductor, "IRF620, IRF621, IRF622, IRF623 N-Channel Power MOSFETs Datasheet," Datasheet 360. [Online]. Available: <https://www.datasheets360.com/pdf/6024079611255238387>. [Accessed: 18-Nov-2020].