

Rancang Bangun Driver PZT dan Filtering Sinyal Akustik pada Sonar Aktif

Adhi Kusuma Negara¹, Henry M. Manik², dan Susilohadi³

¹Program Studi Magister Kelautan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor
Jl. Rasamala, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor
Jl. Rasamala, Kampus IPB Darmaga Bogor 16680

³Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Gedung B.J. Habibie Jalan M.H. Thamrin Nomor 8, Jakarta Pusat 10340
e-mail: henrymanik@apps.ipb.ac.id

Abstrak—Transduser akustik merupakan komponen *source level* dalam persamaan sonar yang sangat diperlukan sebagai sumber energi akustik bawah air, dengan pola pancar tertentu yang disebut *beamforming*. Dalam riset ini, kami merancang pembangunan sebuah rangkaian *driver* akustik untuk men-trigger sebuah transduser piezoelektrik (PZT) agar menghasilkan pancaran energi akustik untuk tujuan deteksi target bawah air. Pembuatan driver akustik dengan prinsip kerja sederhana telah dilakukan untuk memberikan perintah *transmit* (TX) dan *receive* (RX). Modul RX akan menerima sinyal akustik dari TX dan hasilnya direkam untuk analisis. Pencampuran sinyal informasi dengan *noise* membuat informasi yang diperoleh tidak dapat langsung diverifikasi sehingga diperlukan proses pengolahan sinyal untuk dapat memisahkan antara sinyal informasi dan *noise*. Kalibrasi menggunakan target bola *sphere* dilakukan untuk mengetahui hasil deteksi dan level intensitas akustiknya. Metode analisa dan visualisasi sinyal menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT) dan *wavelet*.

Kata kunci: *transduser, driver akustik, beamforming, bandpass filter, piezoelektrik*

Abstract—Acoustic transducer is a source level component in the sonar equation that is indispensable as an underwater acoustic energy source, with a certain emission pattern called *beamforming*. In this research, we designed the construction of a driver circuit to trigger a piezoelectric (PZT) transducer to produce an acoustic energy beam for the purpose of detecting underwater targets. The manufacture of an acoustic driver with a simple working principle has been carried out to provide *transmit* (TX) and *receive* (RX) commands. The RX module will receive the acoustic signal from the TX and the results are recorded for analysis. The mixing of the information signal with noise makes the information obtained cannot be directly verified so that a signal processing process is needed to be able to separate the information signal and noise. Calibration using a spherical target was carried out to determine the detection results and the acoustic intensity level. Signal analysis and visualization methods use *Fast Fourier Transform* (FFT) and *wavelets*.

Keywords: *transducer, acoustic driver, beamforming, bandpass filter, piezoelectric*

I. PENDAHULUAN

Pembangkit akustik menjadi suatu komponen yang diperlukan untuk tujuan pendeteksian bawah air [1]. Hal ini karena kemampuan rambat akustik di air jauh lebih baik dibandingkan gelombang elektromagnetik, dengan menggunakan gelombang akustik jangkauan pendeteksian akan lebih jauh [2]. Pendeteksian target dari satu titik ke titik lain di dalam air diperlukan sebuah pembangkit energi akustik [3]. Energi akustik bisa diaplikasikan untuk mengukur jarak, mengidentifikasi jenis sedimen dasar laut, mengetahui volume suatu kumpulan organisme, mengukur pergerakan sedimen, pendeteksian migas, komunikasi bawah air dan beberapa penerapan terbaru seperti *intelligent biomass* pada kolom air [4], [5].

Pentingnya fungsi pembangkit akustik bawah air untuk berbagai tujuan di atas, menjadi tantangan bagaimana membangun suatu pembangkit akustik bawah air atau sebuah *driver piezoelectric* (PZT) untuk tujuan deteksi target bawah air [6].

Pembangkit pulsa atau generator sinyal berfungsi untuk membangkitkan frekuensi kerja dari *driver* PZT, yaitu berupa rangkaian *microcontroller* yang di dalamnya telah diprogram [7].

Inverter adalah rangkaian elektronika daya yang memiliki fungsi untuk mengubah atau mengkonversi tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak balik (AC). Karena itulah rangkaian daya ini disebut juga *inverter* karena sesuai dengan fungsinya [8]. Dalam mendesain *driver* PZT, *inverter* memiliki peran penting

untuk menguatkan sinyal *trigger* pada modul transmit (TX) agar mampu diberi beban PZT.

Impedansi *internal* pada masing-masing komponen di dalam sirkuit menyebabkan perubahan respon pada PZT, oleh karena itu perlu dilakukan *matching impedace* pada komponen di sekitar PZT untuk disesuaikan impedansi total nya agar tercapai kondisi dimana PZT bervibrasi secara optimal [9].

Bagian *receive* (RX) berfungsi menerima sinyal pantulan akustik dari target atau *echo*, dan juga merupakan rangkaian penguat sinyal yang telah dilengkapi dengan *narrow bandpass* filter. Filter ini merupakan filter analog untuk menapis noise yang ikut terdeteksi bersama *echo* dari hidrofona. Filter aktif ini didesain dari sebuah *Operational Amplifier (Op-Amp)* dengan kombinasi kapasitor yang memiliki nilai tertentu sesuai perhitungan [10]. Selanjutnya sinyal *echo* siap direkam untuk dilakukan analisa.

Salah satu bagian pendukung *driver* PZT adalah sumber tegangan DC. Pada penelitian ini menggunakan converter tipe *Full Bridge (FB) zero-voltage-switched (ZVS)* yang merupakan suatu sirkuit sakelar elektronik yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi yang membutuhkan daya tinggi [11]. Penggunaan sirkuit ini adalah sebagai *converter* DC-to-DC yang mampu merubah tegangan DC rendah menjadi DC yang lebih tinggi dan selanjutnya disimpan dalam *capacitor bank* sebagai catu daya *driver* PZT [12].

Persamaan sonar digunakan untuk mengetahui sejauh mana besarnya energi akustik yang telah dihasilkan oleh rancang bangun driver PZT maupun faktor lingkungan yang mempengaruhinya, apakah telah memenuhi syarat minimum untuk mendeteksi target.

Pada bagian akhir, ditampilkan hasil kalibrasi pancaran akustik yang dihasilkan oleh rancang bangun *driver* PZT ini dengan target bola *sphere* [13], sehingga dapat dilakukan analisa data.

II. STUDI PUSTAKA

Penelitian ini menggunakan beberapa persamaan sebagai acuan penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya.

A. Formula Inverter pada Modul TX

Modul TX merupakan bagian dari pemancar akustik yang berfungsi sebagai pembangkit sinyal listrik pada PZT. Lebar amplitudo tegangan atau voltase pada desain driver perlu ditingkatkan sesuai dengan kebutuhan desain, menggunakan rangkaian inverter. Perhitungan desain inverter dan *matching impedance* rangkaian elektronik untuk driver PZT merujuk pada [7] dan dituliskan sebagai berikut:

$$R_i = \frac{8V_1^2}{(\pi^2 + 4)P_{Ri}} \quad (1)$$

dimana R_i merupakan resistansi beban, V merupakan tegangan pada desain driver, dan P_{Ri} merupakan daya

beban

$$C_1 = \frac{I_0}{\omega\pi V_1^2} = \frac{1}{\omega R_i \left(\frac{\pi^2}{4} + 1 \right) \frac{\pi}{2}} \quad (2)$$

C_1 adalah besaran kapasitor dimana $\omega = 2\pi f$.

$$C = \frac{1}{\omega R_i \left(Q \frac{\pi(\pi^2 - 4)}{16} \right)} \quad (3)$$

Untuk mencari kapasitas C dengan muatan listrik (Q) dapat menggunakan persamaan berikut:

$$L_f = 2 \left(\frac{\pi^2}{4} + 1 \right) \frac{R}{f} \quad (4)$$

$$L_s = \frac{QR_i}{\omega} \quad (5)$$

dimana L_s merupakan induktor seri.

$$V_{Ri(max)} = V_1 \frac{4}{\sqrt{\pi^2 + 4}} \quad (6)$$

dimana $V_{Ri(max)}$ adalah tegangan maksimum pada R_i .

$$V_{S(max)} = 3.562V_1 \quad (7)$$

dimana $V_{S(max)}$ merupakan tegangan pada mosfet.

$$I_f = \frac{8}{\pi^2 + 4} \left(\frac{V_1}{R_i} \right) \quad (8)$$

dimana I_f adalah arus pada induktor.

$$I_{Ri} = \left(\frac{\sqrt{\pi^2 + 4}}{2} I_{L_f} \right) \quad (9)$$

dimana I_{Ri} merupakan arus yang melewati R_i .

$$V_{C(max)} = \left(\frac{I_{Ri(max)}}{2\pi fC} \right) \quad (10)$$

dengan $V_{C(max)}$ adalah tegangan maksimum pada C.

$$V_{L(max)} = 2\pi fL (I_{Ri(max)}) \quad (11)$$

dimana $V_{L(max)}$ merupakan tegangan maksimum pada induktor.

$$I_{S(max)} = \left(\frac{\sqrt{\pi^2 + 4}}{2} + 1 \right) I_{L_f} \quad (12)$$

dimana $I_{S(max)}$ arus seri maksimum dan I_{L_f} arus yang terjadi saat terjadi resonansi pada induktor.

$$I_{S(rms)} = \left(\frac{\sqrt{\pi^2 + 28}}{4} \right) I_{L_f} \quad (13)$$

dimana $I_{S(rms)}$ adalah arus rata-rata

$$P_{rDS} = I_{S(rms)}^2 \times r_{DS} \quad (14)$$

dimana P_{rDS} merupakan daya pada mosfet melalui drain dan source.

$$R = R_s = \frac{8}{\pi^2 + 4} \frac{V_1^2}{P_{Ri}} \approx 0.5768 \frac{V_1^2}{P_{Ri}} \quad (15)$$

Sehingga nilai impedansi pada kapasitor C_1 dapat ditulis sebagai:

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{\pi(\pi^2 + 4)R_s}{8} \approx 54466R_s \quad (16)$$

dimana:

$$X_L = \omega L = Q_L R \quad (17)$$

dengan X_L adalah impedansi pada induktor dan Q_L adalah muatan listrik pada induktor.

$$R_s = \frac{R_i}{1+q^2} = \frac{R_i}{1+\left(\frac{R_i}{X_{C3}}\right)^2} \quad (18)$$

dimana X_{C3} adalah impedansi pada C_3 dan X_{C3} merupakan impedansi pada C_s yang dapat ditulis sebagai:

$$X_{C3} = \frac{X_{C3}}{1+\frac{1}{q^2}} = \frac{X_{C3}}{1+\left(\frac{X_{C3}}{R_i}\right)^2} \quad (19)$$

$$q = \sqrt{\frac{R_i}{R_s} - 1} \quad (20)$$

dimana q merupakan besarnya muatan listrik

$$X_{C3} = R_s \sqrt{\frac{R_i}{R_s} - 1} \quad (21)$$

$$R_{DC} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{(1-D)[\pi(1-D)\cos\pi D + \sin\pi D]}{\omega C_1 \tan(\pi d + \varnothing)\sin\pi D} \quad (22)$$

dimana R_{DC} adalah resistansi DC dan D adalah duty cycle modulations.

B. Formula Matching impedance pada modul TX

Matching impedance adalah suatu rangkaian yang berfungsi untuk menyesuaikan impedansi input pada driver dengan impedansi output pada beban PZT. Formula yang digunakan untuk menentukan besarnya komponen C_2 dan C_3 pada *matching impedance* adalah [7]:

$$X_{C2} = \frac{I}{\omega C_2} = R_s \left[Q_L - \frac{\pi(\pi^2 - 4)}{16} - q \right] \quad (23)$$

$$X_{C3} = \frac{I}{\omega C_3} = \frac{R_i}{q} = \frac{R_i}{\sqrt{\frac{R_i}{R_s} - 1}} \quad (24)$$

$$P_{Ri} = \frac{V_{0,rms}^2}{R_i} \quad (25)$$

dengan P_{Ri} adalah daya pada beban

C. Narrow Bandpass Filter pada modul RX

Modul *Receiver* RX berfungsi untuk menerima sinyal echo dari hidrophon [14]. Sinyal yang diterima selalu

tercampur noise dari lingkungan. Diperlukan bandpass filter untuk membatasi sinyal yang diterima agar echo yang terdeteksi menjadi lebih optimal.

$$R_1 = \frac{Q}{2\pi f_c C A_f} \quad (26)$$

dengan R_1 adalah resistansi input, R_2 resistansi input dengan ground, R_3 resistansi umpan balik, f_c frekuensi centre, Q muatan listrik, C muatan kapasitor, A_f penguatan sinyal.

$$R_2 = \frac{Q}{2\pi f_c C (2Q^2 A_f)} \quad (27)$$

$$R_3 = \frac{Q}{2\pi f_c C} = \frac{Q}{\pi f_c C} \quad (28)$$

$$A_f = \frac{R_3}{2R_1} \quad (29)$$

$$R_2' = R_2 \left[\frac{f_c}{f_c'} \right]^2 \quad (30)$$

dengan R_2' adalah nilai R_2 yang baru akibat pengaturan ulang, demikian juga f_c' adalah nilai f_c yang baru.

D. Persamaan Sonar

Perhitungan sinyal selanjutnya menggunakan formula yang telah umum digunakan untuk menyelesaikan pemodelan akustik berupa *Source level* (SL), *Target Strength* (TS), *Transmission loss* (TL), *Echo Intensity* (EI), *Echo Level* (EL), *Noise Level* (NL), *Sonar to Noise Ratio* (SNR). Sehingga menurut [1], [15] beberapa persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$SL = 10 \log \left(\frac{I_i}{I_r} \right) \quad (31)$$

I_i merupakan intensitas yang dipantulkan, I_r intensitas yang diterima

$$TS = 10 \log \left(\frac{a^2}{4} \right) \quad (32)$$

$$TL(\text{absorption}) = 20 \log(r) + 2\alpha r \quad (33)$$

$$EI(\text{dB}) = (SL - TL) + TS \quad (34)$$

$$EL = SL - 2TL + TS \quad (35)$$

$$NL = 10 \log \left(\frac{\text{noise intensity}}{\text{reference intensity}} \right) \quad (36)$$

$$NL(\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}) = -15 + 20 \log f \quad (37)$$

$$NL_{\text{total}}(\text{dB re } 1 \mu\text{Pa}) = 31.02 + 10 \log(909.1) \quad (38)$$

$$SNR = SL - 2TL + TS - (NL_{\text{tot}} - AG) \quad (39)$$

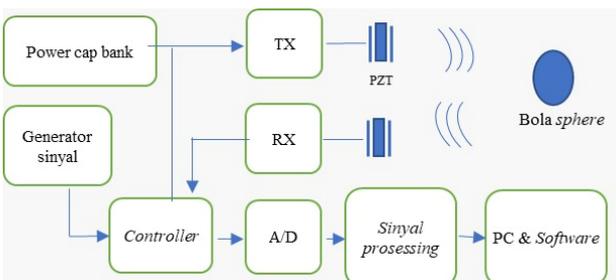
III. DESAIN PENELITIAN

Secara umum, pembuatan rancang bangun *driver* PZT ini diawali dengan pembuatan *generator* sinyal, kemudian pembuatan sistem TX yang di dalamnya terdiri aktif *switching mosfet inverter* [8] dan *matching impedance* [7]. Selanjutnya sinyal yang dihasilkan akan ditransmisikan melalui medium menggunakan *underwater transducer* PZT. Pembuatan sistem RX difungsikan untuk mendeteksi *sinyal echo* yang kembali dari target menggunakan desain *Op-Amp* dengan *narrow active bandpass filter*. Selanjutnya data *echo* yang telah diunduh, dilakukan konversi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan transformasi FFT yang ada pada *tools* Matlab 2018b dan menampilkan hasil menggunakan transformasi *wavelet* [16], seperti diagram penelitian *driver* PZT yang terlihat ditunjukkan pada Gambar 1.

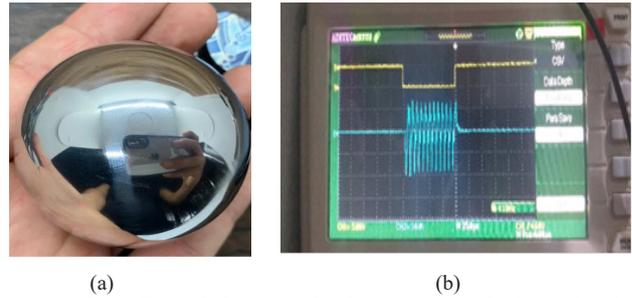
Kalibrasi pancaran sinyal akustik dilakukan pada tahap akhir kegiatan menggunakan target bola *sphere*, lihat Gambar 2(a), yang dilakukan pada sebuah *Watertank* Divisi Akustik dan Instrumentasi Kelautan, Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK-IPB [13], [17]. Pengujian deteksi akustik dilakukan menggunakan sensor pemancar akustik dari sebuah transmitter *multibeam echosounder* (MBES) *Reson Teledyne T-50* dan sensor penerima dari sebuah hidrofona. Data yang direkam kemudian diproses untuk *denoising* dan analisa deteksi target. Proses analisis sirkuit dilakukan menggunakan beberapa formula sesuai dengan teori terkait yang digunakan agar hasil yang diperoleh sesuai atau mendekati dengan desain rancangan dan dibandingkan dengan hasil penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya.

Sinyal dari generator sinyal atau disebut dengan *Pulse Width Modulation* (PWM) sangat penting dalam proses transmisi sinyal akustik. PWM merupakan sinyal yang memiliki kondisi ‘on’ dan ‘off’ secara periodik dengan frekuensi tertentu [18]. Generator sinyal dapat dibuat menggunakan *microcontroller* Arduino nano ataupun tipe lainnya, seperti terlihat pada Gambar 2(b).

Model sinyal yang dibangkitkan bisa dalam bentuk ‘ping’ hanya satu pulsa maupun ‘burst’ lebih dari satu. Generator sinyal digital menghasilkan tingkat kestabilan yang cukup baik, hal ini karena *microcontroller* menggunakan kristal sebagai pengatur ‘denyut’ atau *clock* pada *output*-nya sehingga mampu mempertahankan frekuensi kerja dengan baik.



Gambar 1. Blok diagram penelitian driver PZT



Gambar 2. (a) Target bola sphere dari bahan tungsten 34.5 mm dan (b) Tampilan osiloskop dari generator sinyal 125 kHz yang dibangkitkan oleh microcontroller Arduino mode burst

A. Sirkuit Kelistrikan TX dan RX pada Driver PZT

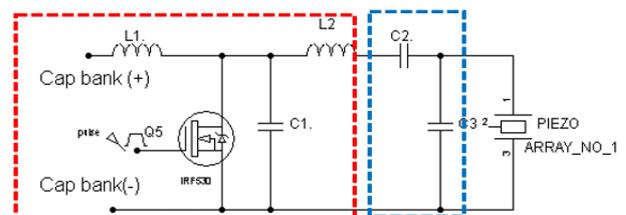
Pembuatan rancang bangun *driver* PZT terdiri dari beberapa bagian yang saling terkait agar bisa menjadi satu kesatuan sistem yang sinkron. Pemilihan desain rangkaian serta penggunaan komponen yang tepat akan sangat mempengaruhi hasil akhir.

1. Modul TX

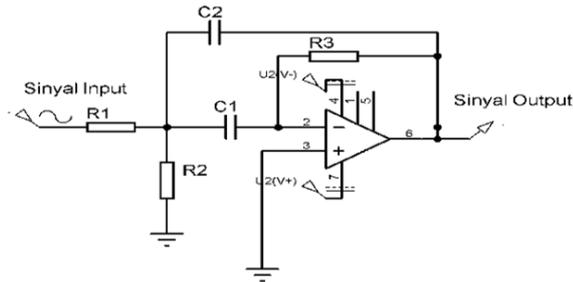
Salah satu bagian penting dari driver PZT adalah modul TX, yaitu sebuah modul rangkaian elektronik yang berfungsi merubah energi listrik menjadi energi akustik. Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat bahwa modul TX memiliki 2 bagian utama, yaitu *Inverter switching* mosfet yang ditandai dengan batas biru dan bagian *matching impedance* dengan tanda batas merah. Sistem ini menggunakan *inverter switching mosfet* sehingga memiliki kelebihan dibandingkan mode *switching transistor* karena tingkat efisiensinya yang cukup tinggi, dan rugi-rugi daya yang rendah [8]. Tegangan yang akan dikuatkan adalah input dari generator sinyal agar mampu diberi beban PZT.

Setiap rangkaian elektronik di dalam masing-masing komponen memiliki impedansi beban internal atau dikenal dengan impedansi *resistif*, impedansi *capacitive* maupun *inductive* [19]. Adanya komponen pada suatu rangkaian elektronik akan menghasilkan impedansi yang jumlah totalnya harus diperhitungkan agar *output* vibrasi pada PZT yang dihasilkan menjadi lebih optimal.

Perhitungan impedansi yang tidak sesuai, akan menyebabkan sistem transfer energi dari energi listrik menjadi energi akustik (getaran pada PZT) menjadi kurang maksimal atau bahkan tidak terjadi vibrasi. *Matching impedance* atau penyesuaian impedansi diperlukan agar energi yang berasal dari sumber daya dapat diteruskan ke transduser dengan maksimal.



Gambar 3. Rangkaian inverter PZT (batas merah) dan matching impedance (batas biru)



Gambar 4. Sirkuit narrow bandpass filter

2. Modul *narrow bandpass* filter (RX)

Modul *narrow bandpass* filter merupakan modul yang berfungsi untuk menguatkan sinyal input atau *echo* dari hidrofons. Sinyal yang diterima selalu mengandung *noise* yang berasal dari lingkungan sekitar transduser dan hidrofons, hal ini dikenal dengan istilah *reverberation*. Oleh karena itu untuk meminimalkan *reverberation* dan menguatkan sinyal *echo*, maka *Op-Amp* harus ditambahkan *bandpass* filter, seperti terlihat pada Gambar 4.

Jika *noise* yang masuk terlalu kuat, tentunya akan mengganggu sinyal *echo*. Hal ini akan menurunkan kemampuan deteksi. *Bandpass* filter berfungsi untuk memfilter *noise*, *Op-Amp* berfungsi menguatkan sinyal. Tipe *Bandpass* yang digunakan adalah *narrow band*, karena kita ingin lebar *band* yang diloloskan oleh filter harus cukup sempit, sehingga diharapkan hanya sinyal *echo* saja yang diproses untuk dikuatkan.

B. Asumsi Analisis

Sebelum dilakukan analisis lebih lanjut, ada beberapa asumsi pada beberapa komponen yang perlu disesuaikan pada kondisi tertentu untuk mempermudah dalam melaksanakan analisa [7].

1. Pada modul TX, *mosfet* diasumsikan sebagai sakelar ideal yang resistansinya nol pada saat “on”, dan resistansi tak hingga pada saat “off”.
2. Waktu yang diperlukan untuk *switching* adalah nol.
3. Induktansi pada *choke* harus cukup tinggi sehingga resistansi pada komponen *ac*-nya jauh lebih rendah daripada resistansi pada komponen arus input DC.
4. *Quality Factor* beban *QL* atau koefisien dari rangkaian resonansi harus cukup tinggi sehingga arus yang melalui induktor *L*, kapasitor *C*, dan resistor *R*, adalah dalam bentuk sinusoidal.
5. Pada modul sirkuit *narrow bandpass* filter, nilai Q dan diasumsikan adalah sama nilainya.
6. Nilai *gain* minimal 10 agar lebih terlihat pola penguatannya.
7. Jika akan memodifikasi dengan input parameter lain,

Tabel 1. Desain input parameter

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Tegangan input	V_{in}	4.5	VDC
Power beban AC	P_{ri}	80	mW
Frekuensi	f_r	125	kHz
Penguatan	Q	10	-
reaktansi D-S mosfet	r_{DS}	0.54	Ohm
Duty cycle	D	50	%
Resistan PZT	R_{pzt}	173.06	Ohm

diupayakan saat desain kapasitor dan menggunakan maksimal sebesar 10 nF atau dibawahnya untuk meminimalisir munculnya nilai komponen yang tidak rasional.

C. Desain Parameter

Pada penelitian ini digunakan beberapa parameter yang dianggap telah memenuhi persyaratan dalam pembuatan rancang bangun *driver* PZT. Adanya modifikasi nilai input sangat dimungkinkan untuk mendapatkan hasil sedekat mungkin dengan komponen yang tersedia di pasaran. Adapun parameter yang telah ditentukan sebagaimana terlihat pada Tabel 1.

D. Analisa

Pada bagian ini ditunjukkan proses perhitungan desain modul TX dan RX. Selanjutnya karena telah dilaksanakan pengujian rancang bangun *driver* PZT ini menggunakan bola *sphere* sebagai target yang dideteksi, maka akan juga disampaikan persamaan sonar yang digunakan untuk menguji karakteristik sinyal TX dan RX yang telah dihasilkan.

1. Modul TX

Salah satu tujuan penting pada desain modul TX, adalah bagaimana mengetahui besarnya nilai komponen inverter selanjutnya mencair kapasitor dan yang akan digunakan pada rangkaian *matching impedance*. Susunan komponen tersebut bisa dianalisa untuk dicari parameter-parameter kelistrikannya. Menurut [7], tahapan pertama yang dilakukan adalah sebagai berikut:

Dengan asumsi efisiensi rangkaian inverter sebesar 95% dan $\omega = 2\pi f$ maka muatan beban AC pada inverter menggunakan persamaan (1) dengan hasil 146 Ω . Besarnya nilai kapasitor *shunt* C_1 menggunakan (2) adalah 1.6 nF. Selanjutnya nilai *capasitor* seri (gabungan *L*, *C*, R_i *Resonant circuit*) menggunakan (3) adalah 0.986 nF. Induktor menggunakan (4) sebesar 0.821 mH. Nilai induktor seri L_s dengan (5) adalah 1.9 mH. Selanjutnya tegangan beban AC atau V_{ri_max} menggunakan (6) adalah 4.83 V. Tegangan pada *switch mosfet* V_{s_max} menggunakan (7) adalah 4.50 V. Aliran arus pada *choke* induktor I_f menggunakan (8) sebesar 17.8 mA. Arus beban AC = I_{ri_max} menggunakan (9) adalah 0.062 mA. Tegangan seri *Capasitor* resonansi = V_{C_max} menggunakan (10)

Tabel 2. Hasil kalkulasi komponen dan parameter pada modul TX

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Resistansi beban AC	Ri	146.0027	Ohm
Kapasitor C1	C1	1.60E-09	Farad
Kapasitor seri	C	9.86E-10	Farad
Induktor input	Lf	8.21E-04	H
Induktor seri	Ls	1.90E-03	H
Tegangan beban max	Vri_max	4.83E+00	V
Tegangan pada switch	Vs_max	4.50E+00	V
Arus pada induktor	If	1.78E-02	A
Arus Ri max	Iri_max	6.15E-05	A
volt cap max	VC_max	1.18E-07	V
volt induc max	VL_max	0.886771	V
Arus seri rms	Is_max	9.46E-05	A
Arus seri max	Is_rms	1.538457	A
Power mosfet	PrDs	1.278099	watt
resistor ekuivalen seri	Rs	1.46E+02	Ohm
reaktansi cap C1	Xc1	7.95E+02	Ohm
reaktansi induktif	XL	1.46E+03	Ohm
reaktansi cap C3	XC3	4.02E+02	Ohm
reaktansi cap seri	XCs	62.85271	Ohm
reaktansi cap C2	XC2	1.23E+03	Ohm
Power PZT	Ppzt	1.73E+02	W
Cap C2	C2	1.04E-09	F
Cap C3	C3	3.17E-09	F

adalah 0.000118 mV. Tegangan seri Induktor resonansi = menggunakan (11) sebesar 0.887 V. Arus pada *switching max* = $I_{s(max)}$ menggunakan (12) adalah 0.095 mA. Besar arus pada *switching rms* = $I_{s(rms)}$ menggunakan (13) adalah 1.538 A. Efek power mosfet pada saat kondisi *loss* = P_{rDS} menggunakan (14) sebesar 1.278 W.

Ekuivalen resistansi seri = R_s menggunakan (15) adalah 146 Ω . Reaktansi cap X_{C1} menggunakan (16) adalah 795 Ω . Reaktansi induktif = X_L menggunakan (17) adalah sebesar 1.46 k Ω . Resistansi ekivalen seri, R_s dapat diperoleh dengan menggunakan (18) sebesar 146 Ω . Reaktansi cap seri = X_{Cs} menggunakan (19) adalah 62.85 Ω . Nilai q ditentukan di awal perhitungan menggunakan (20). Selanjutnya sebagai pembanding, X_{Cs} menggunakan (21). Besarnya reaktansi pada $C_2 = X_{C2}$ menggunakan (23) adalah 1.23 k Ω . Reaktansi pada $C_3 = X_{C3}$ menggunakan (24) adalah sebesar 402 Ω . Besarnya nilai C_2 dan C_3 dapat dicari menggunakan (18) dan (19). Adapun power output yang dihasilkan oleh rangkaian *matching impedance* di atas dapat diketahui menggunakan (25) yaitu sebesar 173 W. Untuk lebih jelas hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2.

Dengan hasil $f_R = 125820$ Hz \approx atau 125.82 kHz. Hasil ini tidak terpaut jauh hasilnya jika dibandingkan dengan penelitian [7] menggunakan frekuensi 416 kHz untuk driver PZT dengan menggunakan skema rangkaian pada Gambar 3. Nilai f_R dapat disesuaikan dengan desain pembuatan rancang bangun sonar. Desain diantaranya

berupa jangkauan pancar sinyal, tingkat ketelitian deteksi, pola pancar beam, maupun ukuran dimensi target yang akan dideteksi. Semakin rendah frekuensi, pola *beam forming* yang dihasilkan akan semakin lebar. Jangkauan *near field* dan *far field* akan semakin jauh, namun ketelitian menurun, demikian juga jika sebaliknya. Penggunaan sonar dengan pola *broadband* frekuensi kontinyu pada transduser tunggal sangat optimal untuk deteksi multi target dengan beragam ukuran/dimensi [20].

2. Modul RX

Desain RX menggunakan *Op-Amp* dengan narrow bandpass filter. Sistem receiver yang baik sangat menentukan hasil deteksi maupun kualitas sinyal yang diterima agar bisa diproses lebih lanjut.

Terdapat beberapa langkah yang dilakukan untuk menentukan besarnya komponen R dan C pada sistem *narrow bandpass* filter, yaitu sebagai berikut:

- Menentukan besarnya kapasitor *non polar* dimana $C_1 = C_2 = C$. Besarnya nilai kapasitor bisa menggunakan nilai pendekat dengan 100 nF atau di bawahnya. Dalam hal sebagai contoh kami gunakan $C_1 = C_2 = C = 680$ pF.
- Menentukan R_1 menggunakan (26), dimana Q adalah perbandingan *gain* yang diterima, dengan lebar *band* yang diloloskan, f_c adalah frekuensi tengah dan A_f adalah nilai *gain* maksimum pada saat puncak amplitude di frekuensi tengah. Nilai Q harus ditentukan lebih besar atau sama dengan 10 untuk mendapatkan komposisi sebagai *narrow bandpass* filter, dengan hasil $R_1 = 2K$.
- Menentukan R_2 menggunakan (27) dengan hasil 43 Ω .
- Menentukan nilai R_3 menggunakan (28). Kemudian untuk mempertahankan A_f harus pada kondisi $A_f < 2Q^2$, maka pada saat menggunakan (29), berdampak terjadi pergeseran frekuensi tengahnya sebagai akibat adanya respon umpan balik dari filter, ataupun karena penguatan *gain*. Selanjutnya dilakukan penyesuaian pada R'_2 menggunakan (30) menjadi $R_3 = 43$ Ω .
- Mengatur kembali nilai R_2 dengan persamaan (29).

Dari hasil perhitungan yang dilakukan dari langkah 1 hingga 5 di atas, diperoleh hasil perhitungan R dan C sesuai pada Tabel 3.

3. Perhitungan Sonar

Untuk menguji hasil pancaran, kami mencoba melakukan metode kalibrasi bola *sphere* dan integrasi *echo* di sebuah *water tank* yang berisi air tawar dengan kedalaman maksimal 2.5 m. Frekuensi yang digunakan sebesar 200 kHz untuk pengukuran TS, lihat Gambar 5.

Tabel 3. Hasil perhitungan R dan C pada sirkuit narrow bandpass filter

No	Komponen	Nilai
1	R1	2K
2	R2	43 Ohm
3	R3	43 Ohm
4	C1 = C2	680pF



Gambar 5. Uji respon hidrofona pada sinyal ping Multibeam Echosounder saat melaksanakan eksperimen di laboratorium akustik kelautan IPB

Bola *sphere* yang terbuat dari material *tungsten carbide* dengan diameter 38.5 mm diletakkan sejauh 1 m dari permukaan *transducer*, sedangkan permukaan *transducer* diletakkan sejauh 0.5 m di bawah permukaan air [13].

Jika jarak bola *sphere* yang digunakan sebagai target berada pada jarak 1m dari pusat akustik dan besarnya power yang digunakan saat pengambilan data adalah $P = 200$ watt. Jika diasumsikan jarak standar adalah 1 yard, maka perhitungannya sebagai berikut:

a. $SL = 10 \log P + 171.5$ dB maka akan didapat besaran SL[13] menggunakan persamaan (31) adalah sebesar 193.81 dB.

b. *Target strength* (TS) [4], dapat dicari menggunakan persamaan (32) yaitu dengan hasil sebesar -40.42 dB. Hasil pengukuran TS bola *sphere* ini mendekati penelitian Steven (2016) dengan hasil -42.5 dB pada bola *sphere* dengan diameter 35mm [13].

Sinyal yang dipantulkan merambat kembali ke instrumen akustik, intensitas sinyal dikurangi lagi oleh *Transmission Loss* (TL) atau dalam hal ini disebut *absorption loss*.

Pada target bola *sphere*, power dari transduser diradiasikan ke semua arah dengan energi yang sama besar, sehingga $P = \text{intensitas} \times \text{area}$. $P = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 = \dots = 4\pi r^2 I_r$

c. *Transmission Loss* (TL) karena *spreading*, dapat dicari menggunakan (33). Jika $r_1 = 1$ m serta *sound speed* = 1451.3 m/s, dan menggunakan referensi pendekatan untuk pengukuran akustik di *water tank*, sesuai penelitian [21] dengan $\alpha = 0.01$ dB/m, maka didapat nilai TL *absorption loss* adalah sebesar 0.02 dB.

d. *Echo Intensity* (EI) adalah besarnya intensitas *echo* yang diukur dari jarak satu meter dari target akibat sinyal yang dipancarkan dari sumber (SL) [1]. Nilai EI menggunakan persamaan (34) didapat hasil sebesar 153.38 dB

e. Besarnya *echo* yang diterima oleh *receiver* RX disebut *Echo Level* (EL) [15]. Nilai EL dengan menggunakan persamaan (35) dengan hasil 153.37 dB.

f. Besarnya *Noise Level* (NL), didapat menggunakan persamaan (36) dengan *reference intensity* adalah gelombang tekanan rms dalam (dB re 1 μPa). Nilai

Tabel 4. Hasil perhitungan soner

Sonar Par	Value	unit
SL	193.81	dB
TS	-40.42	dB
TL (abs)	0.02	dB
EL	153.38	dB
EL	153.37	dB
NL	60.61	dB (re 1 μPa)
SNR	116.74	dB

noise intensity bisa didapat dengan cara merekam *noise* disekitar transduser menggunakan hidrofona dengan jarak sekitar 1m, atau menurut *Urlick* [15], jika frekuensi yang digunakan adalah 200 kHz maka NL didapat sebesar 31.02dB (dB re 1 μPa). Dari hasil *data logging* diketahui *pulse length* $T = 1.1 \times 10^{-3}$ s,

g. *Array gain* (AG)=24 dB maka *bandwidth* (BW) = $1/T = 909.1$ Hz. Maka total NL_{total} (dB re 1 μPa) dengan menggunakan (38) sebesar 60.61 (dB re 1 μPa).

h. *Signal-to-noise-ratio* (SNR) [4], menggunakan (39) dengan hasil sebesar 116.74 dB

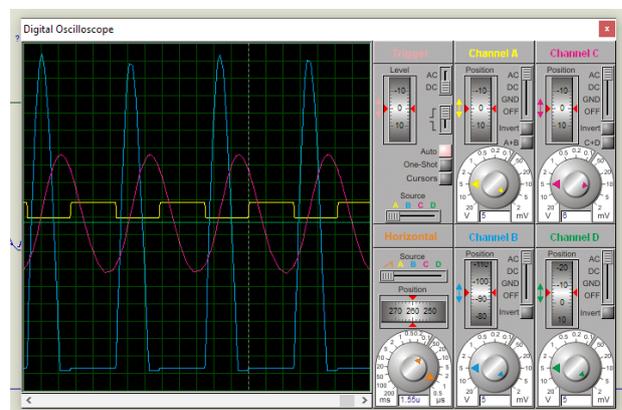
Hasil perhitungan sonar dapat dilihat pada Tabel 4.

IV. HASIL RANCANG BANGUN DAN PEMBAHASAN

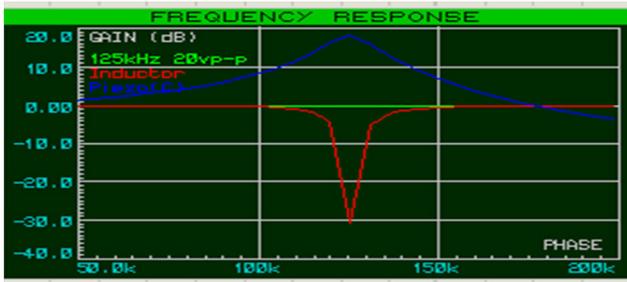
A. Modul TX

Komposisi komponen pada *Rangkaian Op-Amp* dan *matching Impedansi* telah menghasilkan respon penguatan sinyal pada saat diberi input arus dengan frekuensi 125 kHz seperti yang terlihat pada Gambar 6, dengan kurva kuning adalah sinyal *trigger* sebesar 5 V. Sinyal biru merupakan *output* induktor sebesar 90 V. Sinyal merah menunjukkan kondisi resonansi pada PZT sebesar 35 V.

B. Modul RX



Gambar 6. Plotting rangkaian TX menggunakan instrumen proteus. Kurva kuning: tegangan trigger (5mv/p), kurva biru: tegangan induktor (5mv/p), kurva merah: tegangan PZT (5mv/p)



Gambar 7. Hasil plot respon gain terhadap frekuensi dengan proteus

Hasil simulator respon *narrow bandpass* filter terhadap perubahan frekuensi menggunakan proteus dapat dilihat pada Gambar 7 di bawah ini. Kurva biru merupakan respon *gain* transduser PZT.

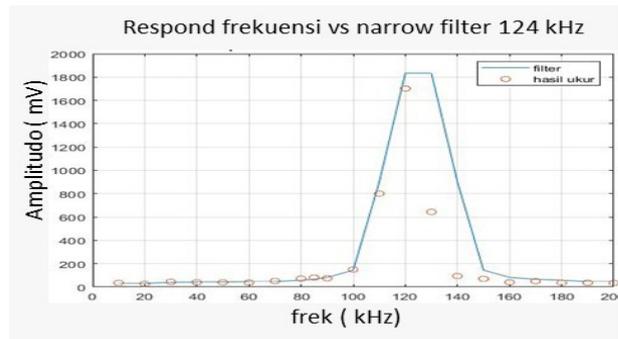
Kurva merah merupakan respon kumparan induktor terhadap frekuensi. Dengan kata lain, rancangan modul RX ini akan menguatkan sinyal secara maksimal jika diberikan sinyal dengan frekuensi 125 kHz.

Desain modul TX dan RX bekerja pada frekuensi 125 kHz, selanjutnya dilaksanakan diuji pancar dengan frekuensi mulai dari 10 Hz hingga 200 kHz, lihat pada Gambar 8. Hasil ukur sinyal yang didapat selanjutnya diplot *overlay* dengan pola filter.

Data sinyal hasil ukur dengan (simbol bulat merah) terlihat berada di dalam area batas *bandpass* filter (kurva biru). Data sinyal mulai 10 kHz hingga 100 kHz diredam oleh filter, begitu pula sinyal dengan frekuensi 150 kHz ke atas. Hanya sinyal pada frekuensi tengah 125 kHz yang diloloskan.

C. Perhitungan Sonar

Sinyal *output* dari TX (*SL*) dapat diukur besar intensitas akustiknya dalam dB. *SL* menjadi lebih lemah saat bergerak menuju target, hal ini disebabkan oleh dispersi geometrik dan kehilangan akibat penyerapan [17].



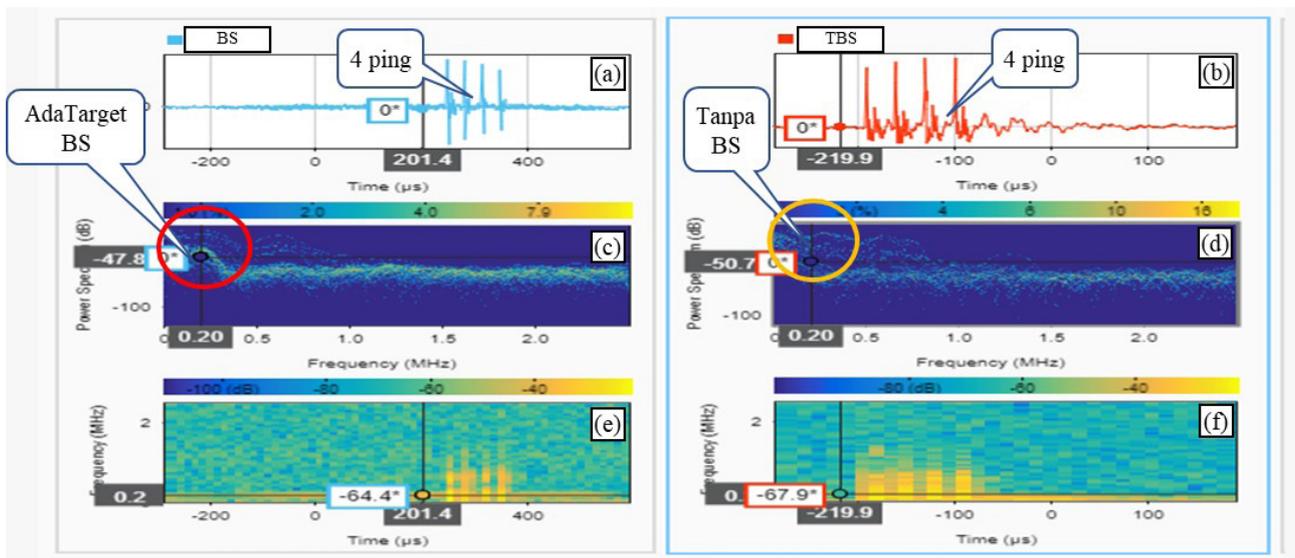
Gambar 8. Hasil plot data uji TX dengan narrow bandpass filter

Penurunan intensitas sinyal total disebut *Transmission Loss (TL)* dalam satuan dB. Intensitas *echo* relatif terhadap intensitas suara yang mengenai target disebut *Target Strength (TS)* dalam dB. Dari hasil analisa telah diketahui bahwa target bola *sphere* diameter 34.5 mm telah berhasil dideteksi dengan nilai *TS* sebesar -40,42 dB, mendekati hasil penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya [13].

D. Visualisasi Hasil Deteksi

Berdasarkan Gambar 9, dapat dilihat hasil visualisasi spektrum akustik dari hasil rancang bangun driver akustik untuk mendeteksi target bola *sphere*, menggunakan *tools* fungsi *Fast Fourier Transform (FFT)* dan *wavelet* pada aplikasi *signal analyzer* pada Matlab 2018b. Frekuensi sinyal yang digunakan adalah 200 kHz dengan pola pancar 4 ping per detik (terlihat 4 buah sinyal berurutan pada kurva biru dan merah).

Pada tampilan *spektrum* (baris paling atas) terlihat perbedaan hasil deteksi antara gambar 9(a) (kurva biru) ada target bola *sphere* dan gambar 9(b) (kurva merah) tanpa target bola *sphere*. Selanjutnya tampilan *persistence spectrum* Gambar 9(c) (baris kedua dari atas) pada



Gambar 9. (a) Tampilan spectrum dengan target bola sphere (BS), (b) Tampilan spectrum tanpa bola sphere (TBS), (c) Tampilan persistence spectrum dengan BS, (d) tampilan persistence spectrum TBS, (e) Tampilan spectrogram dengan BS, dan (f) Tampilan spectrogram TBS

lingkaran merah terlihat adanya peningkatan kerapatan *intensitas* dari target bola *sphere*. Sedangkan pada Gambar 9(d) (baris kedua dari atas) pada lingkaran kuning tidak terlihat adanya kerapatan intensitas energi akustik, karena memang tidak terdapat target bola *sphere*. Selanjutnya pada tampilan *spectrogram* Gambar 9(e) (baris paling bawah) pada tanda kursor terlihat target dengan intensitas sebesar -40.42 dB (berdasarkan warna yang terdeteksi). Sedangkan pada Gambar 9(f) (baris paling bawah) pada kursor tidak ada target.

V. KESIMPULAN

Telah dilakukan penelitian tentang pembuatan rancang bangun *driver* PZT dan *filtering* sinyal akustik untuk mendeteksi target bawah air. *Driver* PZT dengan *switching mosfet inverter*, berfungsi dengan baik untuk menaikkan tegangan. Impedansi beban total dan pada modul TX harus diperhitungkan dengan cermat supaya total impedansi masih berada pada kondisi resonansi PZT. *Narrow bandpass* filter berfungsi memisahkan *noise* dari sinyal echo sesuai desain frekuensi yang direncanakan dengan cara mengatur komponen *R* dan *C* menggunakan persamaan bandpass filter. Persamaan sonar dapat memberikan informasi seberapa besar faktor-faktor akustik yang ada pada TX selaku *SL*, yang dibuktikan dengan hasil deteksi target bola *sphere*. FFT dan *wavelet* sangat efektif untuk menampilkan spektrum energi akustik sehingga memudahkan dalam visualisasi dan analisa target.

Kegiatan penelitian pembuatan sonar aktif ini dapat dikembangkan untuk penelitian pada aplikasi lainnya yang terkait dengan sistem deteksi maupun monitoring bawah air. Terutama bagi TNI AL, instansi pemerintah ataupun swasta yang sangat membutuhkan pengawasan keamanan di bagian kolom perairan, area pelabuhan atau pengembangan dan penerapan lainnya di bidang eksplorasi bawah air.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih sebesar besarnya kepada Dinas Pendidikan TNI AL, Dinas Penelitian dan Pengembangan TNI AL atas bantuan pendanaan serta beberapa alat penunjang lainnya yang diperlukan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] H. Medwin, C. S. Clay, and T. K. Stanton, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*, United States: Academic Press, 1999.
- [2] H. M. Manik, Susilohadi, B. R. Kusumah, A. Dwinovantyo, and S. Solikin, "Designing ocean acoustic waveguide remote sensing for target detecting and tracking," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1075, no. 1, pp. 0–6, 2018.
- [3] S. V. S. and N. Tiwari, "Modelling of a hydroacoustic projector to produce low frequency sound," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 147, no. 4, pp. 2682–2693, 2020.
- [4] H. M. Manik, Y. Nishimori, Y. Nishiyama, T. Hazama, A. Kasai, R. Firdaus, L. Elson, and A. Yaodi, "Developing signal processing of echo sounder for measuring acoustic backscatter," in *Proc. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 429, no. 1, p. 012034.
- [5] H. Husin, S. Saat, Y. Yusop, and S. K. Nguang, "Development of 416kHz PZT driver for acoustics energy transfer applications," in *Proc. IEEE 12th Int. Colloq. Signal Process. its Appl.* March 2016, pp. 88–93.
- [6] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class of high-efficiency tuned switching power amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 10, pp. 168–76, 1975.
- [7] T. Nagashima, X. Wei, T. Suetsugu, M. K. Kazimierzczuk, and H. Sekiya, "Waveform equations, output power, and power conversion efficiency for class-E inverter outside nominal operation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 4, pp. 1799–1810, 2014.
- [8] A. M. Soliman, "A new filter configuration using current feedback op-amp," *Microelectronics J.*, vol. 29, no. 7, pp. 409–419, 1998.
- [9] H. K. Yoon, S. K. Han, J. S. Park, G. W. Moon, and M. J. Youn, "Zero-voltage switching two-transformer full-bridge PWM converter with lossless diode-clamp rectifier for PDP sustain power module," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1243–1251, 2006.
- [10] H. L. Jun-rui Liang, "Design of a Class-E Inverter for Piezoelectric," in *Symp. Piezoelectricity, Acoust. Waves, Device Appl.*, 2014, pp. 118–121.
- [11] S. Solikin and H. M. Manik, "Pengukuran refleksi akustik bola sphere menggunakan instrumen quantified fish finder," in *Proc. Semin. Nas. Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi*, Dec. 2020, pp. 57–60.
- [12] H. M. Manik, "Designing acoustic transmitting receiving system for measurement of fish density," in *Proc. 2nd Int. Conf. Instrum. Control Autom.*, Nov. 2011, pp. 349–351.
- [13] J. Urick, R, *Principles Of Under Water Sound*, 1st ed. USA: The Kingsport Press, 1975.
- [14] D. Xiaoheng, L. Minghang, M. Jiashu, and W. Zhengyu, "Edge detection operator for underwater target image," in *Proc. 3rd IEEE Int. Conf. Image, Vis. Comput.*, June 2018, pp. 91–95.
- [15] A. Ma, H. M. Manik, and T. Hestirianoto, "Rancang Bangun Algoritma dan Aplikasinya pada Akustik Single Beam untuk Pendeteksian Bawah Air," *J. Teknol. Perikan. dan Kelaut.*, vol. 4, no. 2, pp. 173-183, 2013.
- [16] V. Vlatkovic, J. A. Sabate, R. B. Ridley, F. C. Lee, and B. H. Cho, "Small-signal analysis of the phase-shifted PWM converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 7, no. 1, pp. 128–135, 1992.
- [17] M. K. Kazimierzczuk and J. Jwik, "Resonant DC/DC Converter with Class-E Inverter and Class-E Rectifier," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 36, no. 4, pp. 468–478, 1989.
- [18] H. M. Manik, "Measurement and numerical model of fish target strength for quantitative echo sounder," *J. ACL Bioflux*, vol. 8, no. 5, pp. 699–707, 2015.
- [19] H. M. Manik, S. Susilohadi, and B. R. Kusumah, "Rekayasa transmitter dan receiver untuk sistem komunikasi bawah air," *Jurnal Rekayasa Elektrika*, vol. 15, no. 3, pp. 162-168, 2019.
- [20] M. A. Sedayu, H. M. Manik, and S. Subarsyah "Teknologi low-frequency acoustic untuk identifikasi gas hidrat berdasarkan perubahan karakter seismik di Perairan Laut Aru," *J. Rekayasa Elektrika*, vol. 17, no. 1, pp. 70-78, 2016.
- [21] H. M. Manik, A. D. Syakti, J.V. Jaya, D. Apdillah, S. Solikin, A. Dwinovantyo, R. Fajaryanti, B. O. Siahaan, and M. Sanubari. "Autonomous underwater vehicle untuk survei dan pemetaan laut" *J. Rekayasa Elektrika*, vol. 13, no. 1, pp. 27-34, 2017.