

VOLUME 7 | NOMOR 2 | OKTOBER 2021

p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ELEKTRIKA

B O R N E O



Diterbitkan oleh
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS BORNEO TARAKAN

p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ELEKTRIKA BORNEO

Volume 7, Nomor 2, Oktober 2021

Ketua Redaksi
(Editor-in-Chief)

Fitriani Said, S.T., M.T.

Dewan Redaksi
(Editorial Board)

Dr. Eng. Linda Sartika, S.T., M.T.

Abdul Muis Prasetya, S.T., M.T.

Abil Huda, S.T., M.T.

Asisten Redaksi
(Editorial Assistant)

Hendra, S.T.

Alamat Redaksi
(Address)

**Gedung D Lantai 3 Kampus Universitas Borneo Tarakan
Jalan Amal Lama No. 1, Tarakan, 77123
Kalimantan Utara, Indonesia**



Diterbitkan oleh:
Jurusan Teknik Elektro Universitas Borneo Tarakan

ELEKTRIKA BORNEO

Volume 7, Nomor 2, Oktober 2021

DAFTAR ISI

1. Kajian Penghematan Energi Listrik Untuk Mereduksi Konsumsi Bahan Bakar Spesifik (SFC) Generator Set Cadangan Pada Gedung Politeknik Muara Teweh
Juli Chandra Teruna..... 1 – 6
2. Metode Forward-Backward Capon Untuk Estimasi Parameter Pada Aplikasi Radar Multi-Antena
Petrick dan Syahfrizal Tahcfullah7 – 13
3. Perancangan Teknologi Sederhana Untuk Membangkitkan Microwave Plasma Dalam Cairan
Muh. Firdan Nurdin, Andi Erwin Eka Putra dan Novriany Amaliyah..... 14–18
4. Pemanfaatan Daun Pinus Jarum Untuk Dijadikan Briket Biocoal Sebagai Energi Listrik Alternatif
Fitriani Said dan Herawati..... 19–24
5. Implementasi Auto Voltage Regulator Pada Sisi Beban Energi Listrik
Nur liya dan Abdul Muis Prasetia..... 25–30

KAJIAN PENGHEMATAN ENERGI LISTRIK UNTUK MEREDUKSI KONSUMSI BAHAN BAKAR SPESIFIK(SFC) GENERATOR SET CADANGAN PADA GEDUNG POLITEKNIK MUARA TEWEH

Juli Chandra Teruna

Politeknik Muara Teweh

julichandra19@gmail.com

Abstract—The electricity system in the Muara Teweh area is an electricity system that is not interconnected with the South and Central Kalimantan electricity system, where until 2015 the projected installed capacity has not been able to meet peak load needs, resulting in a deficit of 1 MW which results in frequent rotating blackouts. This has an impact on customers, so to overcome this, Muara Teweh Polytechnic operates a generator set with a capacity of 140 kVA as a backup power plant with diesel fuel. Based on the results of this study, the electrical power requirement at peak load in the Muara Teweh Polytechnic building is 94.168 kW with a specific fuel consumption of 28.16 liters in 1 (one) hour of operation. With good energy management, the Muara Teweh Polytechnic building can save up to 50% of the peak load with a specific fuel consumption savings of 14.08 liters per hour.

Keywords—Generator set, installed capacity, peak load, Break Specific Fuel Consumption (BSFC) and Break Horse Power (BHP).

Intisari—Sistem kelistrikan di wilayah Muara Teweh merupakan sistem kelistrikan yang tidak terinterkoneksi dengan sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah, dimana sampai tahun 2015 kapasitas terpasang diproyeksikan belum dapat memenuhi kebutuhan beban puncak sehingga mengalami defisit 1 MW yang mengakibatkan sering terjadi pemadaman bergilir. Hal ini berimbas kepada pelanggan sehingga untuk mengatasinya Politeknik Muara Teweh mengoperasikan generator set berkapasitas 140 kVA sebagai pembangkit listrik cadangan dengan bahan bakar jenis solar. Berdasarkan hasil penelitian ini, kebutuhan daya listrik pada saat beban puncak di gedung Politeknik Muara Teweh sebesar 94,168 kW dengan konsumsi bahan bakar spesifik sebanyak 28,16 liter dalam 1 (satu) jam pengoperasiannya. Dengan manajemen energi yang baik, gedung Politeknik Muara Teweh dapat melakukan penghematan samapai 50% dari beban puncak dengan penghematan konsumsi bahan bakar spesifik dalam pengoperasiannya sebesar 14,08 liter setiap jam.

Kata Kunci—Generator set, kapasitas terpasang, beban puncak, konsumsi bahan bakar spesifik/Break Specific Fuel Consumption (BSFC) dan Break Horse Power (BHP).

I. PENDAHULUAN

Kondisi kelistrikan di wilayah Kalimantan Selatan dan Tengah sampai tahun 2014 kapasitas terpasang mencapai 530,31 MW dengan beban puncak mencapai 505 MW. Kapasitas daya terpasang terbesar dari unit-unit pembangkit PLN di wilayah Kalimantan Selatan dan

Tengah adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Asam-asam sebesar 4 x 65 MW. Dengan kondisi kelistrikan seperti ini, sistem kelistrikan di wilayah Kalimantan Selatan dan Tengah harus memiliki cadangan daya listrik minimal sebesar kapasitas terbesar yaitu sebesar 65 MW [1].

Sistem kelistrikan di wilayah Muara Teweh dan sekitarnya merupakan salah satu sistem yang terisolasi dari sistem kelistrikan Kalimantan Selatan dan Tengah, dimana sistem pembangkitan listriknya mengandalkan unit-unit pembangkit tenaga diesel (PLTD). Kapasitas pembangkitan listrik tenaga diesel di Muara Teweh sebesar 6,99 MW yang terdiri dari 7 (tujuh) unit pembangkit dengan kapasitas sebesar 5,99 MW dan sisanya dari sewa mesin pembangkit dari pihak ketiga sebesar 1 MW. Berdasarkan Rencana Penyediaan Tenaga Listrik Kalselteng [2], prakiraan beban puncak di wilayah Muara Teweh pada tahun 2015 diproyeksikan mencapai 7,91 MW sehingga terjadi defisit daya sekitar 1 MW, hal ini akan mengakibatkan pemadaman listrik bergilir di wilayah Muara Teweh.

Melihat kondisi sistem kelistrikan di atas, pemenuhan kebutuhan utama energi listrik pada gedung Politeknik Muara Teweh tidak dapat mengandalkan sepenuhnya dari pasokan dari PLN Muara Teweh, sehingga untuk pemenuhan kebutuhan apabila pasokan dari PLN terputus atau mengalami pemadaman, gedung Politeknik Muara Teweh menggunakan sumber pembangkit listrik cadangan berupa generator set dengan mesin diesel berbahan bakar solar dengan kapasitas pembangkitan daya sebesar 140 kVA. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kebutuhan konsumsi bahan bakar solar dalam pembangkitan daya listrik dengan generator set pada gedung Politeknik Muara Teweh sehingga dapat dipergunakan sebagai dasar perhitungan biaya operasional pembangkitan generator set pada Gedung Politeknik Muara Teweh.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Generator Set

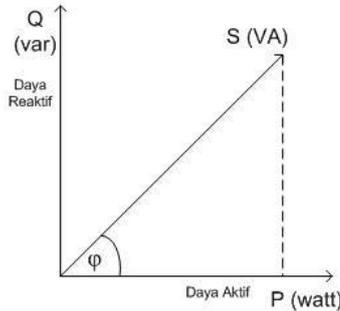
Generator arus bolak-balik (AC) atau alternator adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik.

Prinsip kerja generator sinkron berdasarkan induksi elektromagnetis. Rotor diputar oleh penggerak mula (prime mover) sehingga kutub-kutub yang ada pada

rotor akan berputar. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi yang akan disuplai oleh arus searah sehingga menimbulkan fluks yang besarnya tetap terhadap waktu [3].

2.2 Daya Listrik

Daya dalam sistem pembangkitan listrik bolak balik (AC) terdiri dari daya aktif (P) dengan satuan watt, daya reaktif (Q) dengan satuan VAR dan daya kompleks (S) dengan satuan VA, dimana hubungan ketiga daya tersebut direpresentasikan melalui gambar segitiga daya.



Gambar 1. Segitiga Daya

Berdasarkan gambar segitiga daya di atas, generator menghasilkan daya aktif sebesar P, daya reaktif sebesar Q dan totalnya secara vektor disebut daya kompleks S. Daya aktif (P) dalam satuan watt adalah daya yang digunakan untuk energi kerja sebenarnya. Daya ini yang dikonversikan menjadi energi tenaga mekanik, cahaya atau panas. Daya reaktif (Q) dalam satuan VAR adalah daya yang digunakan untuk pembangkitan fluks magnetik atau medan magnet. Peralatan-peralatan listrik yang memerlukan daya reaktif adalah motor listrik atau dinamo, trafo, ballast lampu yang konvensional dan peralatan listrik lain yang menggunakan proses induksi listrik lilitan untuk operasinya, sedangkan daya nyata (S) dengan satuan VA adalah total perkalian antara arus dan tegangan pada suatu jaringan listrik atau penjumlahan dengan metode trigonometri dari daya aktif dan reaktif dalam segitiga daya.

Gambar segitiga daya tersebut di atas juga merepresentasikan nilai faktor daya atau $\cos \phi$ dalam hubungannya dengan daya. Hubungan 4 variabel secara matematis adalah sebagai berikut [4]:

$$\text{Daya aktif} = P = VI \cos \phi \quad (1)$$

$$\text{Daya reaktif} = Q = VI \sin \phi \quad (2)$$

$$\text{Daya kompleks} = S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} = VI \quad (3)$$

$$\text{Faktor daya} (\cos \phi) = P/S \quad (4)$$

Sedangkan untuk daya aktif yang dibangkitkan generator 3 fasa adalah sebagai berikut [5]:

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \quad (5)$$

2.3 Mesin Diesel

Mesin (engine) sebagai perangkat pemutar sedangkan generator atau alternator sebagai perangkat pembangkit listrik. Engine dapat berupa perangkat mesin disel berbahan bakar solar, mesin berbahan bakar bensin, mesin gas, maupun mesin turbin ada bermacam-macam mesin sesuai dengan kebutuhan.

Mesin diesel termasuk mesin dengan pembakaran dalam dimana energi dimanfaatkan adalah energi termalnya (energi panas). Untuk membangkitkan listrik, sebuah mesin diesel dihubungkan dengan generator dalam satu poros. Penggerak mula atau prime mover merupakan peralatan yang berfungsi menghasilkan energi mekanis yang diperlukan untuk memutar rotor generator. Pada mesin diesel/diesel engine terjadi penyalaan sendiri, karena proses kerjanya berdasarkan udara murni yang dimampatkan di dalam silinder pada tekanan yang tinggi ($\pm 30 \text{ atm}$), sehingga temperatur di dalam silinder naik. Dan pada saat itu bahan bakar disemprotkan dalam silinder yang bersuhu dan bertekanan tinggi melebihi titik nyala bahan bakar sehingga bahan bakar yang diinjeksikan akan terbakar secara otomatis. Penambahan panas atau energi senantiasa dilakukan pada tekanan yang konstan.

Dalam sistem pembangkitan listrik tenaga diesel, daya dari mesin diesel (Break Horse Power, BHP) merupakan daya masukan (input) mekanik untuk memutar generator set sehingga menghasilkan daya keluaran (output) listrik. Perbandingan antara daya keluaran (POut) dan daya masukan (Pin) akan menunjukkan efisiensi (η) kerja mesin generator set. Nilai efisiensi mesin diesel dan generator biasanya sudah tertera pada name plate atau katalog produk mesin atau dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\eta = P_{\text{Out}} / (P_{\text{In}} (\text{BHP})) \times 100\% \quad (6)$$

Membuat estimasi konsumsi bahan bakar berdasarkan pada kalkulasi total daya beban dari penggunaan peralatan listrik. Berdasarkan perhitungan ini dapat dilihat pemakaian bahan bakar pada generator yang digerakan motor bensin dibanding dengan yang digerakan motor diesel. Pada beberapa produk, konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC) sudah dapat diketahui melalui katalog maupun buku manual produk. Estimasi konsumsi bahan bakar motor diesel dapat dihitung dengan persamaan berikut [6]:

$$S = k \times P \times t \quad (7)$$

Dengan

S = Konsumsi solar (liter)

k = 0,2 (Faktor ketetapan konsumsi solar liter per kW per jam)

P = Daya generator (kW)

t = Waktu (jam)

Konsumsi bahan bakar spesifik atau break specific fuel consumption (BSFC) dari suatu generator berdasarkan pada jumlah pemakaian bahan bakar yang dibagi dengan daya output motor bergerak. Dalam perhitungan estimasi bahan bakar pada mesin diesel untuk generator, daya output motor bergerak dianggap sama dengan daya yang dikonsumsi (daya beban) dan harga rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik dihitung dengan persamaan berikut [7]:

$$BSFC = \frac{\dot{m}}{BHP} \quad (8)$$

dengan

BSFC = Break Specific Fuel Consumption (g/kWh)

\dot{m} = Konsumsi bahan bakar per waktu (kg/s)

BHP = Break Horse Power (kW)

Konsumsi bahan bakar spesifik secara umum dapat diketahui sebagai berikut [6] :

a. Otto (gasoline) engine : 273 - 227 g/kWh, dengan nilai rata-rata 250 g/kWh

b. Diesel engine : 209 - 178 g/kWh, dengan nilai rata-rata 194 g/kWh.

Estimasi konsumsi bahan bakar spesifik motor diesel dapat dihitung dengan persamaan [7] :

$$S_{\text{Spesifik}} = \text{BSFC} \times \text{BHP} \times t \quad (9)$$

Dengan

S_{Spesifik} = Konsumsi solar (gram)

BSFC = Konsumsi bahan bakar spesifik (gram/kWh)

BHP = Beban keluaran (kW)

t = Waktu (hour)

Sedangkan berat jenis suatu bahan bakar bergantung pada temperatur dan kandungannya, dan secara umum dapat diambil harga rata-rata dari berat jenis bahan bakar adalah sebagai berikut [6]:

a. Bensin 0,745 kg/L

b. Solar 0,832 kg/L

Secara umum harga rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik adalah dapat dihitung dengan persamaan [6] :

$$S_{(\text{rata-rata})} = S_{\text{Spesifik}} / (\text{berat jenis bahan bakar}) \quad (10)$$

III. METODE PENELITIAN

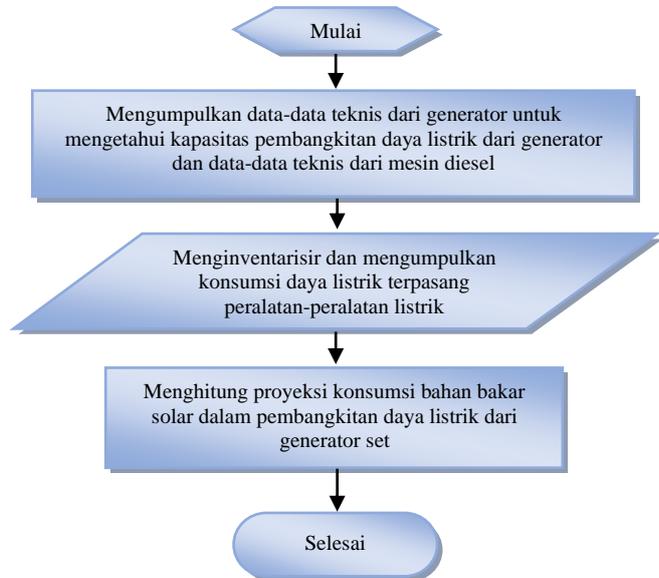
Penelitian tentang estimasi konsumsi bahan bakar generator set dalam pembangkitan daya listrik untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada gedung Politeknik Muara Teweh ini merupakan penelitian kuantitatif deskriptif, dimana data-data yang akan dipergunakan dalam penelitian ini adalah besarnya daya yang dibangkitkan oleh generator set dan besarnya beban pemakaian daya listrik yang dipakai oleh gedung Politeknik Muara Teweh.

Variabel-variabel dalam yang dipergunakan penelitian ini adalah daya mekanik yang dihasilkan mesin diesel dan daya listrik yang dibangkitkan oleh generator set serta daya listrik yang dibutuhkan oleh gedung Politeknik Muara Teweh.

Sumber data yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah data-data hasil pengukuran dari daya listrik yang dibangkitkan oleh generator set maupun data teknis dari mesin diesel dan perhitungan konsumsi daya listrik saat beban puncak pada gedung Politeknik Muara Teweh.

Analisis dari penelitian ini dilakukan dengan menghitung data-data berupa daya listrik yang terbangkit dari generator set dengan kebutuhan daya listrik pada gedung Politeknik Muara Teweh, sehingga dapat diketahui daya mekanik yang dikeluarkan mesin diesel sehingga dapat dihitung konsumsi bahan bakar spesifik dan pada akhirnya dapat memproyeksikan kebutuhan konsumsi bahan bakar solar dalam pembangkitan daya listrik dari generator set pada gedung Politeknik Muara Teweh. Data daya listrik yang terbangkit dapat diketahui

dari *name plate* yang tertera pada generator set dan juga daya yang tertera pada layar display kontrol pada saat generator set dioperasikan. Sedangkan data-data kebutuhan daya listrik dari diperoleh dari pengukuran penggunaan peralatan-peralatan listrik yang dipergunakan terutama saat beban puncak pada gedung Politeknik Muara Teweh.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan observasi dan pengukuran data-data di lapangan dapat diketahui data spesifikasi teknis dari generator set, mesin diesel serta inventarisir peralatan-peralatan dan konsumsi daya listrik yang dipergunakan di gedung Politeknik Muara Teweh. Berdasarkan data-data yang telah dikumpulkan ini maka dapat dihitung dan diketahui proyeksi konsumsi bahan bakar solar dalam pembangkitan generator set untuk memenuhi kebutuhan daya dari peralatan-peralatan yang digunakan pada gedung Politeknik Muara Teweh.

4.1 Data Teknis Generator Set

Generator set yang dipergunakan sebagai pembangkit listrik cadangan pada gedung Politeknik Muara Teweh adalah generator sinkron 3 fasa dengan merk Rexford tipe RF274E14 dengan kapasitas daya terbangkit sebesar 140 kVA.



Gambar 3. Generator Sinkron 3 fasa merk Rexford

Adapun data teknis dari generator set tersebut seperti tabel berikut.

Tabel 1. Data Teknis Generator Set 3 Fasa merk Rexford

No.	Data Teknis	Kuantitas
1.	Daya Nyata (S)	140 kVA
2.	Tegangan (V)	400 Volt
3.	Arus (I)	202 Amper
4.	Faktor Daya (cos φ)	0,8
5.	Frekuensi (f)	50 Hz
6.	Efisiensi (η)	0,88
7.	Putaran (n)	1500 rpm

Berdasarkan data-data teknis generator set 3 fasa di atas dapat dihitung kapasitas pembangkitan daya aktif dari generator set tersebut. Sesuai persamaan dari segitiga daya diketahui hubungan daya nyata (S), daya aktif (P) dan faktor daya (cos φ) yaitu $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ sehingga daya aktif dapat dihitung dengan persamaan $P = S \cdot \cos \varphi$.

Daya aktif (P) yang dibangkitkan oleh generator set merk Rexford sebesar (1) :

$$\begin{aligned}
 P &= S \cdot \cos \varphi \\
 &= 140000 \text{ VA} \cdot 0,8 \\
 &= 112000 \text{ Watt} \\
 &= 112 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Daya aktif (P) yang dibangkitkan oleh generator set 3 fasa merk Rexford juga dapat dihitung (5) :

$$\begin{aligned}
 P &= \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi \\
 &= \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 202 \cdot 0,8 \\
 &= 111959,7642 \text{ Watt} \\
 &\approx 112 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

Selanjutnya daya reaktif (Q) yang dibangkitkan oleh generator set merk Rexford dengan persamaan (3) berikut:

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ atau} \\
 Q &= \sqrt{S^2 - P^2} \\
 &= \sqrt{(140000)^2 - (112000)^2} \\
 &= \sqrt{7056000000} \text{ VAR} \\
 &= 84000 \text{ VAR} = 84 \text{ kVA}
 \end{aligned}$$

4.2 Kebutuhan Daya Listrik

Karakteristik beban daya listrik pada gedung Politeknik Muara Teweh terdiri dari beban daya listrik untuk penerangan, pengkondisi suhu ruangan (AC), peralatan elektronik (komputer dan laptop), peralatan laboratorium serta peralatan pendukung akademik lainnya, dimana pengoperasian peralatan-peralatan listrik tersebut dari pukul 8 pagi samapai pukul 14 siang (rata-rata 6 jam per hari).

Tabel 2. Karakteristik Konsumsi Daya (kW) Peralatan Listrik pada Gedung Politeknik Muara Teweh

No	Nama Gedung	Karakteristik Beban Daya Listrik (kW)			
		Lampu	AC	PC dan Laptop	Lain-lain
1.	Lantai 1 Direktorat	0,990	4,476	8,848	1,770

No	Nama Gedung	Karakteristik Beban Daya Listrik (kW)			
		Lampu	AC	PC dan Laptop	Lain-lain
2.	Lantai 2 Direktorat	0,720	4,103	51,292	1,017
3.	Lantai 1 Perkuliahan	0,972	3,357	3,084	1,714
4.	Lantai 2 Perkuliahan	1,080	3,357	3,932	3,456
Total		3,762	15,29	67,156	7,957
Total konsumsi daya		94,168 kW			

Berdasarkan karakteristik penggunaan beban peralatan-peralatan listrik di gedung Politeknik Muara Teweh di atas, dapat diketahui bahwa pemakaian komputer dan laptop terutama di Laboratorium Komputer 1 dan 2 serta Laboratorium Multimedia mengkonsumsi daya listrik terbesar yaitu sebesar 71% dari total penggunaan daya listrik. Berdasarkan rekapitulasi konsumsi daya listrik pada Tabel 4.6. di atas, maka diketahui bahwa beban puncak penggunaan daya listrik (P) untuk peralatan-peralatan listrik di gedung Politeknik Muara Teweh dari pukul 8 pagi sampai dengan pukul 14 siang adalah sebesar **94,168 kW**.

Faktor daya (cos φ) dari penyaluran daya listrik baik dari PT. PLN maupun dari generator set (cadangan) adalah sebesar 0,8 sehingga dengan menggunakan teorema segitiga daya, dapat dihitung daya kompleks (S) dari konsumsi daya aktif (P) dari peralatan-peralatan listrik yang dipergunakan pada gedung Politeknik Muara Teweh yaitu sebesar (4) :

$$\begin{aligned}
 \cos \varphi &= \frac{P}{S} \text{ sehingga,} \\
 S &= \frac{P}{\cos \varphi} \\
 &= \frac{94,168 \text{ kW}}{0,8} \\
 &= 117,71 \text{ kVA}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan karakteristik peralatan-peralatan listrik yang digunakan, dapat diasumsikan peralatan-peralatan tersebut juga menyerap daya reaktif sebesar (3) :

$$\begin{aligned}
 S &= \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ atau} \\
 Q &= \sqrt{S^2 - P^2} \\
 &= \sqrt{(117710)^2 - (94168)^2} \\
 &= \sqrt{4988031876} \text{ VAR} \\
 &= 70626 \text{ VAR} = 70,626 \text{ kVAR}
 \end{aligned}$$

Jika pengelola Politeknik menerapkan sistem manajemen energi yang baik seperti mengontrol pengkondisi udara pada ruangan-ruangan yang tidak dipergunakan, mengkondisikan mode *screen saver* pada PC dan laptop yang tidak dipergunakan terus-menerus, memanfaatkan penerangan alami pada siang hari serta melakukan penghematan pada semua peralatan listrik lainnya maka dapat diasumsikan konsumsi daya listrik akan berkurang sehingga beban puncak juga akan berkurang seperti yang terjadi pada di bawah ini.

Tabel 3. Asumsi Penghematan Konsumsi Daya Listrik (kW) pada Gedung Politeknik Muara Teweh

No	Nama Gedung	Asumsi Penghematan Daya Listrik (kW) dari Beban Puncak				
		10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
1	Lantai 1 Direktorat	14,5	12,9	11,3	9,7	8,0
2	Lantai 2 Direktorat	51,4	45,7	40,0	34,3	28,5
3	Lantai 1 Perkuliahan	8,2	7,3	6,4	5,5	4,5
4	Lantai 2 Perkuliahan	10,6	9,4	8,3	7,1	5,9
Total konsumsi daya (kW)		84,7	75,3	66,0	56,6	46,9

Berdasarkan rekapitulasi asumsi penghematan daya listrik pada Tabel 4.7. di atas, maka diketahui bahwa beban puncak penggunaan daya listrik untuk peralatan-peralatan listrik di gedung Politeknik Muara Teweh dari pukul 8 pagi sampai dengan pukul 14 siang dapat diasumsikan sebesar **46,9 kW** sampai dengan **84,7 kW**.

4.3 Data Teknis Mesin Diesel

Penggerak utama (*prime mover*) dari generator set adalah mesin diesel dengan merk Deutz tipe BF 6M 1013-E bermesin turbo.



Gambar 4. Mesin diesel merk Deutz tipe BF 6M 1013-E

Adapun data teknis dari mesin diesel tersebut seperti tabel berikut.

Tabel 4. Data Teknis Mesin Diesel merk Duetz BF 6M 1013-E

No.	Data Teknis	Kuantitas
1.	Daya	128 kW
2.	Putaran (<i>n</i>)	1500 rpm
3.	Efisiensi (η)	0,95
4.	Frekuensi (<i>f</i>)	50 Hz
5.	Jumlah silinder	6 (enam)
6.	<i>Specific Fuel Consumption</i>	208 – 212 g/kWh
7.	Sistem pendingin	<i>External Cooled</i>

4.4 Estimasi Konsumsi Bahan Bakar

Berdasarkan rekapitulasi kebutuhan beban daya listrik gedung Politeknik Muara Teweh pada saat beban puncak adalah sebesar 94,168 kW, maka daya masukan P_{In} (BHP) dapat dihitung dengan persamaan (6) :

$$\eta = \frac{P_{Out}}{P_{In}(BHP)} \times 100\%$$

$$P_{In}(BHP) = \frac{P_{Out}}{\eta} = \frac{P_{Out}}{(\eta_{mek} \cdot \eta_g)}$$

$$= \frac{94,168 \text{ kW}}{(0,95 \times 0,88)}$$

$$= \mathbf{112,64 \text{ kW}}$$

Sedangkan estimasi konsumsi bahan bakar spesifik dari mesin diesel untuk menggerakkan generator pada saat beban puncak selama 1 (satu) jam dapat dihitung dengan persamaan (7) :

$$S_{Spesifik} = SFC \times BHP \times t$$

$$= 208 \frac{g}{kWh} \times 112,64 \text{ kW}$$

$$= 23429,12 \text{ g} = 23,43 \text{ kg}$$

sehingga secara umum harga rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik adalah dapat dihitung dengan persamaan (10) :

$$S_{rerata} = \frac{S_{Spesifik}}{\text{berat jenis bahan bakar solar}}$$

$$= \frac{23,43 \text{ kg}}{0,832 \text{ kg/l}} = \mathbf{28,16 \text{ l}}$$

Jadi estimasi harga rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik mesin diesel untuk menggerakkan generator set selama 1 (satu) jam adalah sebanyak **28,16 liter**. Berdasarkan rekapitulasi asumsi penghematan konsumsi daya listrik peralatan listrik (Tabel 3) yang ada pada gedung Politeknik Muara Teweh, estimasi konsumsi bahan bakar spesifik dari mesin diesel untuk menggerakkan generator dengan asumsi penghematan 10% dari beban puncak selama 1 (satu) jam dapat dihitung dengan persamaan (6) :

$$P_{In}(BHP) = \frac{P_{Out}}{\eta} = \frac{P_{Out}}{(\eta_{mek} \cdot \eta_g)}$$

$$= \frac{84,7 \text{ kW}}{(0,95 \times 0,88)} = \mathbf{101,32 \text{ kW}}$$

Sedangkan estimasi konsumsi bahan bakar spesifik dari mesin diesel untuk menggerakkan generator pada saat beban puncak selama 1 (satu) jam dapat dihitung dengan persamaan (7) :

$$S_{Spesifik} = SFC \times BHP \times t$$

$$= 208 \text{ g/kWh} \times 101,32 \text{ kW} \times 1 \text{ h}$$

$$= 21074,56 \text{ g} = 21,08 \text{ kg}$$

sehingga secara umum harga rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik adalah dapat dihitung dengan persamaan (10) :

$$S_{rata-rata} = \frac{S_{Spesifik}}{\text{berat jenis bahan bakar solar}}$$

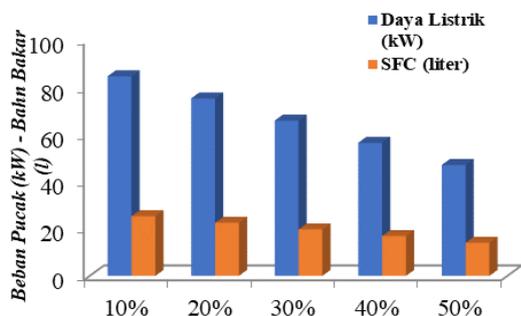
$$= \frac{21,08 \text{ kg}}{0,832 \text{ kg/l}} = \mathbf{25,34 \text{ l}}$$

Jadi estimasi harga rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik mesin diesel untuk menggerakkan generator *set* selama 1 (satu) jam adalah sebanyak **25,34 liter**. Dengan melakukan perhitungan yang sama, rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik mesin diesel untuk menggerakkan generator *set* selama 1 (satu) jam dengan asumsi penghematan konsumsi daya listrik dari peralatan listrik yang digunakan disajikan pada tabel di bawah ini.

Penerapan manajemen energi yang baik seperti mengontrol pengkondisi udara pada ruangan-ruangan yang tidak dipergunakan, mengkondisikan mode *screen saver* pada PC dan laptop yang tidak dipergunakan terus-menerus, memanfaatkan penerangan alami pada siang hari serta melakukan penghematan pada semua peralatan listrik lainnya maka dapat diasumsikan konsumsi daya listrik akan berkurang sehingga beban puncak juga akan berkurang dan pada akhirnya juga menghemat biaya operasional dan konsumsi bahan bakar sistem pembangkit listrik tenaga diesel cadangan pada gedung Politeknik Muara Teweh seperti tersaji pada gambar diagram batang di bawah ini.

Tabel 5. Rata-rata Konsumsi Bahan Bakar Spesifik Mesin Generator *set* selama 1 (satu) Jam Saat Beban Puncak pada Gedung Politeknik Muara Teweh

No	Nama Gedung	Asumsi Penghematan Daya Listrik (kW) dari Beban Puncak				
		10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
1.	Lantai 1 Direktorat	14,5	12,9	11,3	9,7	8,0
2.	Lantai 2 Direktorat	51,4	45,7	40,0	34,3	28,5
3.	Lantai 1 Perkuliahan	8,2	7,3	6,4	5,5	4,5
4.	Lantai 2 Perkuliahan	10,6	9,4	8,3	7,1	5,9
Total konsumsi daya (kW)		84,7	75,3	66,0	56,6	46,9
Rerata konsumsi bahan bakar spesifik (liter)		28,1	25,3	20,4	16,9	14,0



Gambar 5. Perbandingan Beban Puncak dan SFC Genset

Berdasarkan gambar diagram batang di atas, dengan asumsi penghematan 50% dari penggunaan daya listrik pada saat beban puncak dengan menerapkan manajemen energi yang baik, penghematan konsumsi bahan bakar dari pengoperasian mesin generator *set* mencapai 14 liter setiap jam.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan-kesimpulan yang dapat disampaikan dari hasil penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut :

1. Karakteristik beban daya listrik pada gedung Politeknik Muara Teweh terdiri dari beban daya listrik untuk penerangan, pengkondisi suhu ruangan (AC), peralatan elektronik (komputer dan laptop), peralatan laboratorium serta peralatan pendukung akademik lainnya dengan proyeksi beban puncak (pukul 8 sampai dengan pukul 14) adalah sebesar 94,168 kW.
2. Penggerak utama generator *set* adalah mesin diesel bermesin turbo 6 (enam) silinder dengan sistem pendingin luar dengan kapasitas daya keluaran sebesar 128 kW dan efisiensi mesin 0,95 dengan kecepatan putaran sebesar 1500 rpm. Bahan bakar jenis solar dengan konsumsi bahan bakar spesifik pembebanan 100% sebesar 212 g/kWh, pembebanan 75% sebesar 208 g/kWh dan pembebanan 50% sebesar 212 g/kWh.
3. Rata-rata konsumsi bahan bakar spesifik (BSFC) dari mesin diesel untuk menggerakkan generator *set* yang diproyeksikan untuk memikul beban puncak selama 1 (satu) jam diestimasikan sekitar 28,16 liter dan dengan asumsi penghematan 50% pada saat beban puncak dengan menerapkan manajemen energi yang baik, penghematan konsumsi bahan bakar dari pengoperasian mesin generator *set* mencapai 14 liter setiap jam.

REFERENSI

- [1] Sekretariat Perusahaan PT. PLN (Persero), Jakarta. Statistik Tahun 2014, Nomor Publikasi 02701-150430, ISSN 0852 – 150430, April 2015.
- [2] PT. PLN (Persero), Wilayah Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah, Banjarbaru. Rencana Penyediaan Tenaga Listrik (RPTL) Kalimantan Selatan dan Kalimantan Tengah 2010 – 2019, September 2009.
- [3] Berahim, H., Pengantar Teknik Tenaga Listrik, Teori Ringkas dan Penyelesaian Soal, Andi Offset, Yogyakarta, 1994.
- [4] Bird, J., Electrical Circuit Theory and Technology, Revised Second Edition, Newnes, Elsevier Science Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Rd, Burlington, MA 01803, 2003.
- [5] Gonen, T., Electrical Power Distribution System Engineering, McGraw Hill, California State University, Sacramento, 1986.
- [6] Baharrudin dan Ferdi, H., Program Studi Teknik Elektro, Universitas Mercubuana, Jakarta. Perhitungan Optimasi Bahan Bakar Solar pada Pemakaian Generator Set di BTS, Jurnal Teknik Elektro, Volume 6 No. 2, ISSN 2086 – 9479, Mei 2015, halaman 61 – 79.
- [7] Ghiffir, Y. A., Perbandingan Unjuk Kerja Genset 4-Langkah Menggunakan Bahan bakar Bensin dan LPG dengan Menambahkan Mixer Venturi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2010.

METODE *FORWARD-BACKWARD CAPON* UNTUK ESTIMASI PARAMETER PADA APLIKASI RADAR MULTI-ANTENA

Petrick¹, Syahfrizal Tahcfullloh²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia

¹petrickpada220@gmail.com

²rizalubt@gmail.com

Abstract—Multi-antenna radar systems are generally the Phased Array (PA) and the Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) radars, each of which has the main advantages of high coherent gain and high waveform diversity gain. There are many parameters that determine the performance of these radars, one of which is the estimation parameter which is proportional to the radar's ability to determine the number of detectable targets. In this paper, a parameter estimation using the Forward-Backward Capon (FBCapon) method is proposed which has the main advantage of being able to detect the direction of arrival (DoA) with high resolution compared to other conventional methods. The formulation and evaluation of its performance is carried out on factors such as: variation of radar cross section (RCS) of the target, number of DoA, angular resolution between two targets, amplitude detection accuracy, and number of antenna elements on the transmitter-receiver (Tx-Rx). The effectiveness of the estimator performance is compared with the LS estimation applied to both types of radar where the DoA detection capability of the two variants of the Capon method is more accurate than the LS method. The FBCapon estimator has an RMSE of amplitude estimate that is half lower than that obtained by the FCapon estimator. The resolution of the detection angle is better than the LS estimator, for example for $K = L = 8$ then the angle resolution is 5° while the LS estimator is 5.8° .

Keywords—Capon estimator, MIMO radar, parameter estimation, phased-array radar.

Intisari—Sistem radar multi-antena umumnya berupa radar Phased Array (PA) dan Multiple-input Multiple-Output (MIMO) yang masing-masing memiliki kelebihan utama berturut-turut yaitu gain koheren yang tinggi dan gain peragaman sinyal (*waveform*) yang tinggi. Banyak parameter penentu kinerja radar-radar ini salah satunya yaitu estimasi parameter yang proporsional dengan kemampuan radar dalam menentukan jumlah target. Pada penelitian ini diusulkan suatu estimasi parameter dengan metode *Forward-Backward Capon* (FBCapon) yang memiliki kelebihan utama yaitu mampu mendeteksi sudut kedatangan sinyal *echo* atau *direction of arrival* (DoA) beresolusi tinggi dibanding metode konvensional yang lain. Formulasi dan evaluasi kinerjanya dilakukan terhadap faktor-faktor seperti: variasi *radar cross section* (RCS) dari target, jumlah DoA, resolusi sudut antar dua target, akurasi deteksi amplitudo, dan jumlah elemen antena pada transmitter-receiver (Tx-Rx). Keefektifan dari kinerja metode ini dibandingkan dengan estimasi LS yang diterapkan pada kedua jenis radar dimana kemampuan deteksi DoA kedua metode Capon lebih akurat dibanding metode LS. Estimator FBCapon memiliki RMSE pada estimasi amplitudo separuh lebih rendah dari yang diperoleh FCapon. Resolusi sudut deteksinya lebih baik dari estimator LS, sebagai contoh untuk $K = L = 8$ maka

diperoleh resolusi sudut 5° sedangkan estimator LS sebesar $5,8^\circ$.

Kata Kunci—Estimasi parameter, estimator Capon, radar phased array, radar MIMO.

I. PENDAHULUAN

Teknologi pada saat ini berkembang begitu pesat, salah satunya di bidang teknologi radar. Radar (*Radio Detection And Ranging*) adalah suatu sistem yang bekerja dengan memancarkan gelombang elektromagnetik untuk mendeteksi posisi (*jarak/range*) dan kecepatan (*velocity*) dari suatu objek. Penggunaan radar sering dimanfaatkan di bidang militer, pelayaran, penerbangan, informasi cuaca, dan lain-lain. Sistem radar terdiri dari *transmitter* (Tx) dan *receiver* (Rx). *Transmitter* berfungsi untuk memancarkan gelombang elektromagnetik ke suatu objek, sedangkan *receiver* berfungsi sebagai penerima kembali pantulan gelombang elektromagnetik (*echo*) dari sinyal yang terdeteksi oleh target radar.

Pada beberapa dekade terakhir, muncul pengembangan di bidang radar multi-antena atau banyak elemen antena, yang salah satunya dinamakan radar *Phased-Array* (PA). Radar PA memanfaatkan pergeseran fase pada setiap elemen antenanya untuk mengatur *beam* menuju ke arah target yang diinginkan. Hal ini disebabkan adanya penguatan koheren yang tinggi maka radar ini dapat mendeteksi suatu target yang jauh dan kecil [1].

Sementara itu ada juga jenis radar multi-antena lain seperti radar *Multiple Input Multiple Output* (MIMO). Radar MIMO menggunakan beberapa antena untuk memancarkan sinyal *orthogonal* yang mampu memaksimalkan jumlah target yang dapat dideteksi [2] - [3]. Hal ini dapat terjadi karena tiap-tiap sinyal (*waveform*) yang dipancarkan oleh Tx dengan mudah dibedakan satu dengan lainnya karena adanya sifat *orthogonal* tersebut. Melalui beberapa elemen antena yang ada pada radar MIMO dapat ditransmisikan banyak *waveform orthogonal* sehingga radar ini bersifat *waveform diversity* yaitu memiliki banyak peragaman sinyal radar sehingga meningkatkan jumlah objek yang dideteksi.

Berbagai kinerja radar telah diuraikan oleh para peneliti di bidang radar multi-antena terutama yang berkaitan dengan identifikasi atau estimasi parameter target. Metode estimasi parameter dengan *Least Square* (LS) memiliki kelemahan rendah resolusi dan memiliki

sidelobes yang tinggi [4] - [5]. Disamping itu juga teknik ini memiliki deteksi amplitudo yang tidak akurat dimana amplitudo terukur proporsional dengan RCS, serta memiliki resolusi sudut yang kurang baik [6]. Hasil estimasi parameter yang berbeda jika menggunakan estimator Capon, dimana estimator ini memiliki kelebihan dapat mendeteksi lokasi target dan dapat memperkirakan amplitudo yang kompleks serta memiliki resolusi sudut yang lebih baik [7].

Metode estimasi parameter dengan Capon pada radar MIMO telah dilakukan oleh peneliti namun kinerjanya dikaji berdasarkan pengaruh ukuran RCS dan DoA [7]. Di samping itu juga estimator Capon yang dimanfaatkan sejauh ini pada radar ini bersifat *forward* Capon (FCapon) [4]. Sehingga kontribusi utama pada penelitian ini adalah memformulasikan jenis estimator Capon yang dinamakan *forward-backward* Capon (FBCapon). Kinerja estimator ini diinvestigasi berdasarkan pengaruh banyaknya DoA target, jumlah antenna pada Tx-Rx, besar resolusi sudut deteksi antar dua target, akurasi amplitudo yang terdeteksi, dan variasi ukuran RCS.

Pada makalah ini dilakukan formulasi dan evaluasi kinerja estimator yang diusulkan terhadap radar PA dan MIMO yang selanjutnya dibandingkan kinerjanya terhadap estimator LS dan FCapon menurut semua parameter-parameter yang telah disebutkan sebelumnya. Kemudian dilakukan analisis terhadap kemampuan semua estimator tersebut untuk dua jenis radar yaitu radar PA dan MIMO.

Makalah ini diorganisasi sebagai berikut. Bagian II mengulas tentang radar multi-antena yaitu radar PA dan MIMO. Pada Bagian III menyajikan uraian tentang estimator FCapon dan FBCapon terkait formulasinya. Beberapa contoh-contoh simulasi numerik, evaluasi, dan analisisnya diberikan pada Bagian IV. Akhirnya makalah ini disimpulkan pada Bagian V.

II. RADAR MULTI-ANTENA

Seperti yang sudah diketahui, radar PA memberikan *directional gain* yang berguna untuk mendeteksi target yang lemah dan menekan level *sidelobe* ke arah datang interferensi. Misalkan suatu sistem radar dengan antenna-antena yang *co-located* memiliki K antenna pada array Tx dan L antenna pada array Rx. Sinyal pada Rx akan melewati *matched filter* (MF) untuk dipisahkan terhadap sinyal transmit menjadi vektor data $L \times 1$ yaitu [8]

$$\mathbf{y}_{PA} = \sum_p \sigma_p(\theta_p) \mathbf{u}_{PA}(\theta_p) + \mathbf{n}_{PA} \quad (1)$$

dengan vektor *steering* Tx-Rx yaitu

$$\mathbf{u}_{PA}(\theta) = \beta \mathbf{b}(\theta) \quad (2)$$

dengan σ_l dan σ_i berturut-turut menyatakan amplitudo kompleks sinyal ditransmit dari target dan interferensi, β merupakan gain direksional *beam pattern* pada Tx, $\mathbf{b}(\theta)$ adalah vektor perambatan $L \times 1$ yang terjadi karena *delay* perambatan dari Tx ke Rx, dan \mathbf{n}_{PA} adalah $L \times 1$ vektor *additive white Gaussian noise* dengan rerata nol dan matriks kovarians $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{LL}$. Untuk kondisi array Tx dan

array Rx yang *co-located* maka vektor *steering* Rx $\mathbf{b}(\theta)$ definisinya sama dengan vektor *steering* Tx $\mathbf{a}(\theta)$.

Pada radar MIMO telah diakui dapat memperbaiki resolusi radar [9]. Idenya adalah dengan K antenna pada Tx dipancarkan K *waveform* yang *orthogonal* satu dengan lain yang kemudian diterima oleh L antenna di Rx. Adanya MF di Rx akan memisahkan K *waveform* tersebut dengan tepat. Telah dibuktikan bahwa *beam pattern* total pada radar ini merupakan hasil perkalian *beam pattern* pada Tx dan Rx sehingga memberikan resolusi yang tinggi [10]. Radar ini menunjukkan juga bahwa *waveform* yang dipantulkan berasal dari banyak target bersifat independen secara linier sehingga mendukung penerapan banyak teknik estimasi adaptif guna memperoleh resolusi yang tinggi sekaligus mampu menolak interferensi atau *jamming*.

Radar MIMO mempunyai transmisi omnidireksional pada semua elemen transmitnya tanpa membentuk suatu *beam* direksional [8]. Sinyal Rx kemudian dilewatkan pada MF, maka akan menghasilkan vektor data $KL \times 1$ yaitu

$$\mathbf{y}_{MIMO} = \sum_p \sigma_p(\theta_p) \mathbf{u}_{MIMO}(\theta_p) + \mathbf{n}_{MIMO} \quad (3)$$

dengan vektor *steering* Tx-Rx yaitu

$$\mathbf{u}_{MIMO}(\theta) = \mathbf{a}(\theta) \otimes \mathbf{b}(\theta) \quad (4)$$

dengan \otimes menyatakan perkalian Kronecker.

Berdasarkan (2) dan (4), tidak seperti radar PA yang memberikan *directional gain* pada arah target θ maka radar MIMO dapat meningkatkan *degree of freedom* (DoF), resolusi spasial meningkat, dan kinerja deteksi meningkat juga [8].

III. METODE PENELITIAN

A. Metode *Forward Capon* sebagai Estimasi Parameter

Pada estimasi target $\hat{\sigma}(\theta)$ dengan metode LS ternyata mengalami kelemahan berupa *high sidelobes* dan *low resolution* [2], [3], [5]. Di kondisi dengan strong interference dan jamming maka metode LS tidak berfungsi dengan baik. Untuk memperoleh estimasi target dengan resolusi tinggi dan kemampuan menekan interferensi cukup baik maka dapat digunakan metode Capon *beamforming* atau *Minimum Variance Distortionless Response* (MVDR) [11] - [12]. Bila dinyatakan kembali sinyal ekuivalen *baseband* yang diterima oleh L elemen antenna pada array Rx dengan arah target θ_p dinyatakan dengan vektor

$$\mathbf{y}_{MIMO}(t) = \sum_{p=1}^P \sigma_p(\theta_p) \mathbf{b}(\theta_p) \mathbf{a}^T(\theta_p) \boldsymbol{\psi}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (5)$$

dengan $(\cdot)^T$ adalah operator transpose, $\mathbf{a}(\theta) = [1 \ e^{-j2\pi d_k \sin(\theta)/\lambda} \ \dots \ e^{-j2\pi(K-1)d_k \sin(\theta)/\lambda}]^T$ yaitu vektor *steering* $K \times 1$ pada Tx, $\mathbf{b}(\theta) = [1 \ e^{-j2\pi d_L \sin(\theta)/\lambda} \ \dots \ e^{-j2\pi(L-1)d_L \sin(\theta)/\lambda}]^T$ yaitu vektor *steering* $L \times 1$ pada Rx, $\boldsymbol{\psi}(t) = [\varphi_1(t) \ \varphi_2(t) \ \dots \ \varphi_K(t)]^T$ yaitu vektor *waveform* $K \times 1$ dari Tx dengan $\varphi_k(t)$ adalah sinyal *baseband* transmisi waktu diskrit $t = 1, \dots, Q$, $\sigma_p(\theta_p)$ adalah koefisien refleksi radar dari target yang proporsional dengan RCS, p adalah jumlah target yang

memantulkan sinyal pantul ke Rx $p = 1, 2, \dots, P$, θ_p adalah lokasi target, dan $\mathbf{n}(t)$ adalah vektor $L \times 1$ dari *interference plus noise*. Parameter yang akan diestimasi dari $\mathbf{y}_{\text{MIMO}}(t)$ adalah $\{\sigma_p(\theta_p)\}_{p=1}^P$ dan $\{\theta_p\}_{p=1}^P$. Jika diasumsikan $\mathbf{n}(t)$ tidak berkorelasi dengan $\boldsymbol{\psi}(t)$ maka sifat identifiabilitas pada suku pertama dari (5) tidak dipengaruhi oleh suku kedua.

Berikut ini metode Capon yang digunakan untuk mengestimasi jumlah target pada radar MIMO dari (5) dapat dilakukan dengan tahapan yaitu: (a) penentuan beamforming Capon dan (b) estimasi target $\hat{\sigma}(\theta)$ seperti metode LS. Selanjutnya metode ini dikenal dengan nama *forward-Capon* (FCapon) [13].

Beamformer dari FCapon diformulasikan berikut

$$\min_{\mathbf{w}} \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}} \mathbf{w} \text{ terhadap } \mathbf{w}^H \mathbf{b}(\theta) = 1 \quad (6)$$

dimana $(\cdot)^H$ adalah operator Hermitian transpose, $\mathbf{w} \in \mathbf{C}^{L \times 1}$ adalah vektor bobot untuk meningkatkan *noise*, *interference*, dan *jamming suppression* sedangkan sinyal yang diinginkan tidak terdistorsi, $\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}$ adalah matriks kovarians dari sinyal data yang diterima yaitu

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}} = (1/Q) \sum_{q=1}^Q \mathbf{y}(q) \mathbf{y}^H(q) \quad (7)$$

dimana Q adalah jumlah sampel data.

Berdasarkan pada [11] dan [12] maka vektor bobot untuk *beamformer* dari FCapon dinyatakan oleh

$$\hat{\mathbf{w}}_{\text{FC}} = \frac{\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)}{\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)} \quad (8)$$

sehingga output *beamformer* dari FCapon untuk vektor sinyal data yang diterima adalah

$$\hat{\mathbf{w}}_{\text{FC}}^H \mathbf{y}_{\text{MIMO}}(t) = \frac{\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{y}(t)}{\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)} \quad (9)$$

dengan $\mathbf{y}_{\text{MIMO}}(t)$ pada (1) kemudian diterapkan metode LS terhadap (9) maka diperoleh estimasi target untuk FCapon pada radar MIMO seperti berikut.

$$\hat{\sigma}_{\text{FC}}(\theta) = \frac{\sum_{q=1}^Q \mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)}{[\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)] [\mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)]} \quad (10)$$

dengan

$$\hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} = (1/Q) \sum_{q=1}^Q \boldsymbol{\psi}(q) \boldsymbol{\psi}^H(q) \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} = (1/Q) \sum_{q=1}^Q \boldsymbol{\psi}(q) \boldsymbol{\psi}^H(q) \quad (12)$$

B. Metode *Forward-Backward Capon* sebagai Estimasi Parameter

Berikut disajikan ulasan terkait penurunan estimasi *forward-backward Capon* (FBCapon) untuk radar MIMO yang merupakan perluasan analogi dari aplikasi FBAPES untuk aplikasi spektrum sinyal oleh [12] dan merupakan kontribusi utama pada penelitian ini. Metode pererataan *forward-backward* telah banyak dimanfaatkan untuk meningkatkan kinerja pada aplikasi analisis spektral [12]

yaitu untuk metode APES. Sebelumnya telah disajikan estimasi parameter radar MIMO dengan metode FCapon yang menggunakan vektor data dari sinyal yang diterima “maju” (*forward*) yaitu $\mathbf{y}(q) = [y(q) \ y(q+1) \ \dots \ y(q+L-1)]^T$. Untuk vektor dari sinyal yang diterima “mundur” (*backward*) yaitu $\tilde{\mathbf{y}}(q) = [y^*(Q-q-1) \ y^*(Q-q-2) \ \dots \ y^*(Q-q-L)]^T$. Bila dikehendaki output dari data *forward* dan *backward* maka formulasinya FBCapon dinyatakan dengan

$$\min_{\mathbf{w}} (1/2Q) \sum_{q=1}^Q \left\{ \mathbf{w}^H \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}} \mathbf{w} \right\} \left\{ \mathbf{w}^H \tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}} \mathbf{w} \right\} \quad (13)$$

terhadap $\mathbf{w}^H \mathbf{b}(\theta) = 1$. Serupa dengan cara memperoleh (8) maka diperoleh vektor bobot untuk *beamformer* dari FBCapon yaitu

$$\hat{\mathbf{w}}_{\text{FBC}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)}{\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)} + \frac{\tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)}{\mathbf{b}^H(\theta) \tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)} \right) \quad (14)$$

sehingga output *beamformer* dari FBCapon untuk vektor sinyal data yang diterima adalah

$$\hat{\mathbf{w}}_{\text{FBC}}^H \mathbf{y}(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{y}(t)}{\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)} + \frac{\mathbf{b}^H(\theta) \tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}}^{-1} \tilde{\mathbf{y}}(t)}{\mathbf{b}^H(\theta) \tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)} \right) \quad (15)$$

kemudian terapkan metode LS pada (15) maka akan diperoleh estimasi target dari FBCapon untuk radar MIMO yaitu

$$\begin{aligned} & \hat{\sigma}_{\text{FBC}}(\theta) \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{\sum_{q=1}^Q \mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)}{[\mathbf{b}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)] [\mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)]} \right. \\ & \quad \left. + \frac{\sum_{q=1}^Q \mathbf{b}^H(\theta) \tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}}^{-1} \tilde{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)}{[\mathbf{b}^H(\theta) \tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}}^{-1} \mathbf{b}(\theta)] [\mathbf{a}^T(\theta) \hat{\mathbf{R}}_{\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\psi}} \mathbf{a}^*(\theta)]} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

dengan

$$\tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}} = (1/Q) \sum_{q=1}^Q \tilde{\mathbf{y}}(q) \tilde{\mathbf{y}}^H(q) \quad (17)$$

$$\tilde{\mathbf{R}}_{\tilde{\mathbf{y}}\tilde{\mathbf{y}}} = (1/Q) \sum_{q=1}^Q \tilde{\mathbf{y}}(q) \tilde{\mathbf{y}}^H(q) \quad (18)$$

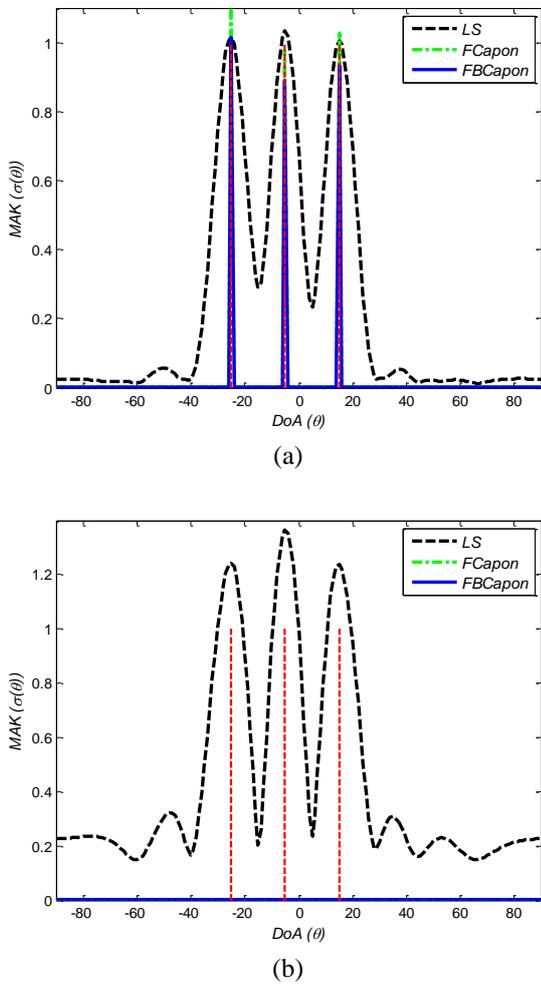
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Evaluasi kinerja estimasi parameter target dengan metode FCapon dan FBCapon pada radar MIMO berturut-turut menggunakan (10) dan (16) sedangkan metode LS menggunakan (44) pada [5]. Kinerja semua estimator pada dua jenis radar disajikan sebagai grafik modulus amplitudo kompleks (MAK) yang bervariasi terhadap DoA dimana MAK proporsional dengan RCS dinyatakan sebagai $\hat{\sigma}(\theta)$. Bila diasumsikan jumlah elemen antenna pada array di Tx-Rx adalah sama, yaitu $K = L = 8$ elemen. Spasi antar elemen antenna pada array Tx-Rx adalah setengah panjang gelombang.

A. Kinerja Semua Estimator terhadap Jenis Radar

Untuk membandingkan kinerja estimator parameter antara metode yang diusulkan, yaitu FBCapon, dengan

metode yang lain, yaitu LS dan FCapon, pada kedua jenis radar multi-antena, yaitu PA dan MIMO, maka diasumsikan ada tiga target berlokasi di $\Theta_A = \{-25^\circ; -5^\circ; 15^\circ\}$ dengan amplitudo kompleks yang proporsional dengan RCS untuk semua target yaitu $\sigma(\Theta_A) = 1$. Pada Gambar 1(a) - 1(b) menunjukkan MAK untuk kinerja semua estimator yang diterapkan seperti LS, FCapon, dan FBCapon pada dua jenis radar yaitu PA dan MIMO.



Gambar 1. Modulus amplitudo kompleks dari berbagai estimator dengan Θ_A dan RCS sama untuk: (a) radar MIMO dan (b) radar PA.

Untuk radar MIMO, kinerja estimator-estimator tersebut secara umum mampu mendeteksi ketiga target dengan tepat seperti pada Gambar 1(a) baik dalam deteksi MAK yaitu mendekati nilai RCS = 1 dan semua DoA pada Θ_A terdeteksi dengan tepat. Sebaliknya pada radar PA di Gambar 1(b), hanya estimator LS yang berfungsi mendeteksi ketiga target walaupun MAK memiliki resolusi yang tidak tepat. Hal ini diulas lebih lanjut pada Bagian IV. F yang menunjukkan pengaruh jumlah elemen array di Tx-Rx terhadap kinerja estimator. Radar PA termasuk memiliki jumlah *waveform* yang ditransmit paling sedikit yaitu semua elemen pada array di Tx, yaitu $K = 8$, memancarkan satu *waveform* saja sehingga sulit untuk mendeteksi banyak target apalagi untuk deteksi DoA maupun MAK yang tepat. Hal tersebut sejalan dengan studi yang dilaporkan oleh [7] yaitu kemampuan deteksi semakin meningkat dengan naiknya jumlah

subarray dimana untuk radar PA subarray-nya bernilai 1 sedangkan radar MIMO memiliki subarray K . Untuk radar MIMO kemampuan deteksi target tinggi karena semua elemen antena pada array di Tx memancarkan K *waveform* sehingga berdampak pada tingginya peragaman *waveform* seperti yang telah dibahas oleh [5].

Tampak juga dari Gambar 1(a), bahwa dengan menggunakan estimator FCapon dan FBCapon memiliki resolusi sudut DoA untuk deteksi lokasi target-target Θ_A lebih akurat dibanding metode LS. Meskipun dari sisi akurasi MAK pada metode LS relatif lebih baik (lihat Gambar 1(b)). Khusus pada radar MIMO di Gambar 1(a), tidak serupa dengan metode LS, kedua estimator Capon hampir tidak memiliki *sidelobe* sehingga kondisi ini menguntungkan bila berhadapan dengan *strong interference* dan *jamming*. Kondisi dan kemampuan estimator Capon tersebut sejalan dengan hasil yang diperoleh oleh [7] mengenai penekanan terhadap *sidelobe*.

Kedua estimator Capon unggul dalam hal deteksi DoA dibanding metode LS (lihat Gambar 1(a)). Untuk melihat kelebihan akurasi deteksi DoA pada kedua estimator Capon tersebut maka dibandingkan dari kemampuan estimasi amplitudonya. Hasil deteksi amplitudo MAK untuk Θ_A pada ketiga estimator untuk radar MIMO tertabulasi pada Tabel I. Metode membandingkan kinerja ketiga estimator tersebut dengan menggunakan pendekatan *Root Mean Square Error (RMSE)* terhadap modulus dari amplitudo kompleks sasaran yaitu RCS bernilai 1. *RMSE* bisa dinyatakan dengan

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\theta_o - \theta_n)^2}{N}} \tag{19}$$

dimana N adalah banyak data perhitungan, θ_o dan θ_n berturut-turut adalah data MAK dari DoA yang dikehendaki dan data MAK dari DoA yang terukur.

Tabel I

Perbandingan kinerja deteksi amplitudo dari semua estimator dengan RCS bernilai 1.

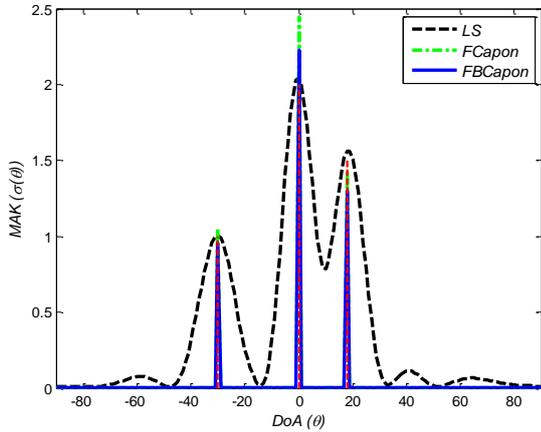
DoA (°)	LS	FCapon	FBCapon
-25	1,015	1,117	1,015
-5	1,035	0,977	0,965
15	1,011	1,028	0,951

Untuk Tabel I maka diperoleh *RMSE* dari MAK untuk estimator LS, FCapon, dan FBCapon berturut-turut adalah 0,023; 0,071; dan 0,036. Untuk kondisi kasus sudut Θ_A ternyata persentase *RMSE* dari MAK pada estimator FBCapon lebih rendah dibanding FCapon yaitu 3,6% berbanding 7,1%. Terbukti dari hasil perhitungan *RMSE* bahwa kinerja estimator FBCapon lebih superior dibanding FCapon. Hal ini juga mendukung hasil studi yang dilaporkan oleh [13] dimana kinerja estimator FBCapon memiliki bias dalam estimasi amplitudo setengah dari yang diperoleh FCapon.

B. Kinerja Estimator terhadap Variasi RCS

Berdasarkan ulasan pada Bagian IV A tentang kinerja radar PA, untuk kondisi RCS yang bervariasi maka perbandingan kinerja estimator dari metode yang diusulkan terhadap metode yang lain hanya diterapkan

pada radar MIMO saja. Jika diasumsikan ada tiga target berlokasi di $\Theta_B = \{-30^\circ; 0^\circ; 18^\circ\}$ dengan amplitudo kompleks yang proporsional dengan RCS untuk semua target berturut-turut yaitu $\{1; 2; 1,5\}$ yang disajikan pada Gambar 2. Pembahasan di bagian ini merupakan kelanjutan dari Bagian IV. A yaitu melihat keunggulan ketiga metode dalam estimasi amplitudo dan DoA.



Gambar 2. MAK dari radar MIMO untuk berbagai estimator dengan Θ_B dan RCS bervariasi.

Tampak dari Gambar 2 bahwa kemampuan deteksi DoA kedua metode Capon lebih akurat dibanding metode LS meskipun ketiga estimator tersebut bisa mendeteksi ketiga target yang diberikan. Tabel II menyajikan data pengukuran dari MAK untuk Θ_B pada semua estimator untuk radar MIMO. Untuk nilai *RMSE* dari MAK untuk estimator LS, FCapon, dan FBCapon berturut-turut diperoleh nilai 0,047; 0,263; dan 0,152. Untuk kondisi kasus sudut Θ_B tersebut ternyata persentase *RMSE* dari MAK pada estimator FBCapon lebih rendah dibanding FCapon yaitu 15,2% dibanding 26,3%. Hasil ini juga menunjukkan keunggulan kinerja estimator FBCapon dibanding FCapon yang mendukung hasil studi yang dilaporkan oleh [13].

Tabel II

Perbandingan kinerja deteksi amplitudo dari semua estimator dengan RCS bervariasi.

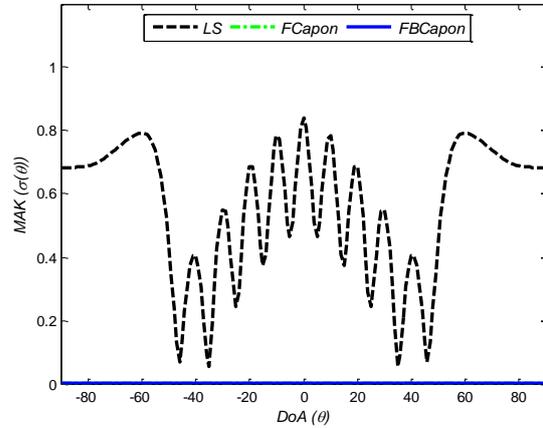
DoA(°)	RCS	LS	FCapon	FBCapon
-30	1	1,006	1,053	0,976
0	2	2,053	2,448	2,225
18	1,5	1,561	1,442	1,365

C. Kinerja Estimator terhadap Banyak Sudut Kedatangan Sinyal

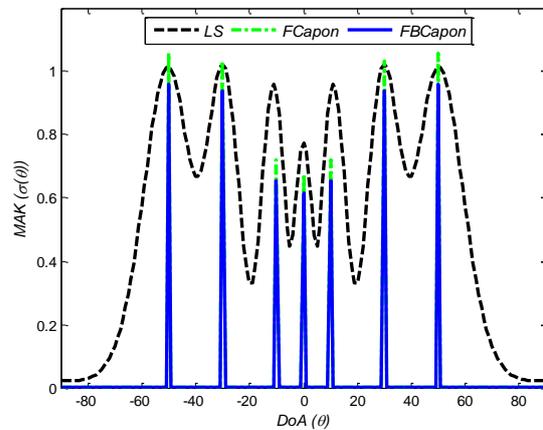
Untuk melihat kinerja semua estimator dalam mendeteksi parameter amplitudo maupun DoA maka bisa dilihat dari kemampuannya mendeteksi banyak atau sedikitnya DoA. Pada evaluasi kinerja ini telah dilaksanakan tiga macam eksperimen dimana setiap eksperimen diterapkan dengan DoA yang bervariasi jumlah dan nilainya dimana semua target ber-RCS satu. Tiga macam eksperimen ini bertujuan untuk melihat pengaruh kemampuan estimasi parameter terhadap banyak sedikit DoA.

Pada Gambar 3(a) - 3(b) menunjukkan kinerja dari estimasi parameter untuk ketiga eksperimen khusus pada

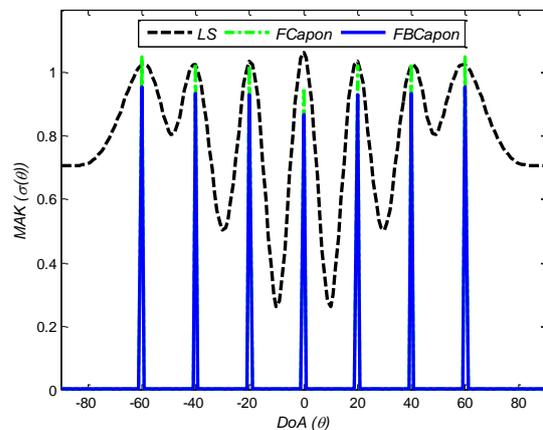
radar MIMO. Jika diasumsikan ada tiga belas target berlokasi di $\Theta_C = \{-60^\circ; -50^\circ; -40^\circ; -30^\circ; -20^\circ; -10^\circ; 0^\circ; 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ; 50^\circ; 60^\circ\}$ dengan diasumsikan memiliki RCS semua satu yang disajikan pada Gambar 3(a). Terlihat hasilnya bahwa hanya estimator LS yang berfungsi daripada kedua estimator Capon namun dari 13 target yang diberikan tidak semua terdeteksi. Hal ini sesuai dengan studi yang dilaporkan oleh [5] bahwa untuk $K = L = 8$ maka jumlah maksimum target yang dideteksi sekitar 7 hingga 32 target.



(a)



(b)



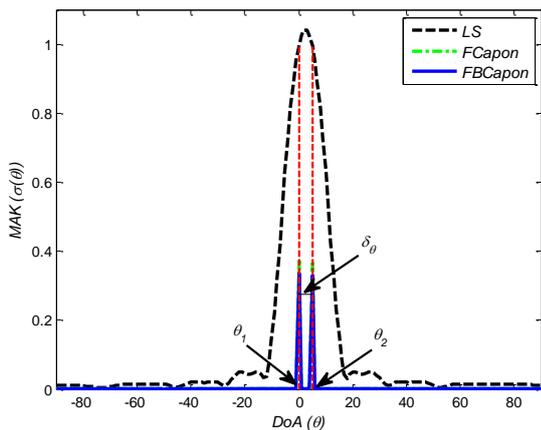
(c)

Gambar 3. MAK pada radar MIMO untuk berbagai estimator yang ber-RCS = 1 dengan DoA yaitu: (a) Θ_C , (b) Θ_D , dan (c) Θ_E .

Untuk Gambar 3(b) - 3(c), merujuk pada [5] maka hasil yang diperoleh pada Gambar 3(b) dengan tujuh target berlokasi di $\Theta_b = \{-50^\circ; -30^\circ; -10^\circ; 0^\circ; 10^\circ; 30^\circ; 50^\circ\}$ dan Gambar 3(c) dengan tujuh target yaitu $\Theta_e = \{-60^\circ; -40^\circ; -20^\circ; 0^\circ; 20^\circ; 40^\circ; 60^\circ\}$ dengan diasumsikan memiliki RCS sama yaitu satu semua mampu dideteksi dengan resolusi yang tepat namun ada beberapa target yang MAK dari DoA tidak akurat. Seperti pada ulasan di Bagian IV A bahwa semua target mampu dideteksi dengan baik oleh ketiga estimator. Estimasi dari MAK untuk semua DoA mampu dideteksi dengan resolusi amplitudo yang baik oleh estimator LS daripada dengan estimator lain. Namun kondisi sebaliknya bahwa untuk estimasi DoA maka kedua varian estimator Capon memiliki resolusi yang superior dibanding dengan estimator LS.

D. Resolusi Sudut Antar Dua Target

Jika diberikan dua DoA yaitu θ_1 dan θ_2 dan $\delta_\theta = (\theta_1 - \theta_2)$, suatu radar memiliki resolusi sudut yang baik jika δ_θ bernilai sangat kecil dengan nilai minimal $\delta_\theta > 0$. δ_θ yang kecil menunjukkan seberapa mampu radar untuk membedakan dua lokasi DoA target yang sangat berdekatan. Pada Gambar 4 jika diasumsikan DoA untuk $\theta_1 = 0^\circ$ dan $\theta_2 = 5^\circ$ maka resolusinya $\delta_\theta = 5^\circ$. Tampak Pada Gambar 4 tersebut bahwa estimator LS tidak mampu mendeteksi kedua DoA tersebut yang berarti resolusi sudut estimatornya rendah. Sebaliknya pada kedua varian estimator Capon mampu mendeteksi kedua target DoA walaupun resolusi amplitudonya tidak mencapai 1 yaitu untuk FCapon dan FBCapon berturut-turut adalah 0,371 dan 0,337. Hal ini sejalan dengan studi yang dilaporkan oleh [7] bahwa estimator Capon memiliki resolusi sudut yang superior dibanding LS.

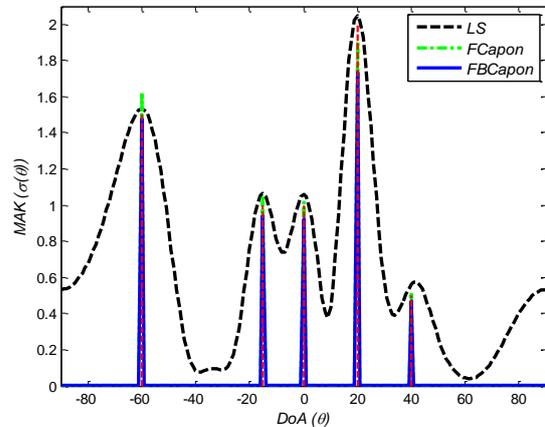


Gambar 4. MAK pada radar MIMO untuk berbagai estimator yang ber-RCS = 1 untuk dengan DoA yaitu: (a) Θ_c , (b) Θ_b , dan (c) Θ_e .

E. Akurasi Deteksi Amplitudo

Sebagaimana ulasan pada Bagian IV A bahwa kedua estimator Capon unggul dalam hal deteksi DoA dibanding metode LS untuk radar MIMO. Namun memperhitungkan RMSE pada (19) untuk MAK dari ketiga estimator maka bisa dibandingkan kemampuan estimasi amplitudonya terutama varian dari metode Capon. Jika diasumsikan ada lima target berlokasi di $\Theta_f = \{-60^\circ; -15^\circ; 0^\circ; 20^\circ; 40^\circ\}$

dengan amplitudo kompleks yang proporsional dengan RCS untuk semua target berturut-turut yaitu $\{1.5; 1; 1; 2; 0.5\}$ seperti yang disajikan pada Gambar 5. Untuk nilai RMSE dari MAK untuk estimator LS, FCapon, dan FBCapon berturut-turut diperoleh nilai 0,058; 0,119; dan 0,062. Dari hasil RMSE tersebut untuk kasus sudut Θ_f ternyata persentase RMSE dari MAK pada estimator FBCapon lebih rendah dibanding FCapon yaitu 6,2% berbanding 11,9%. Hasil ini juga memperkuat ulasan pada Bagian IV B dimana kinerja estimator FBCapon lebih unggul dibanding FCapon serta juga memperkuat hasil investigasi yang dilaporkan oleh [13].



Gambar 5. MAK pada radar MIMO dari berbagai estimator yang bervariasi RCS untuk Θ_f .

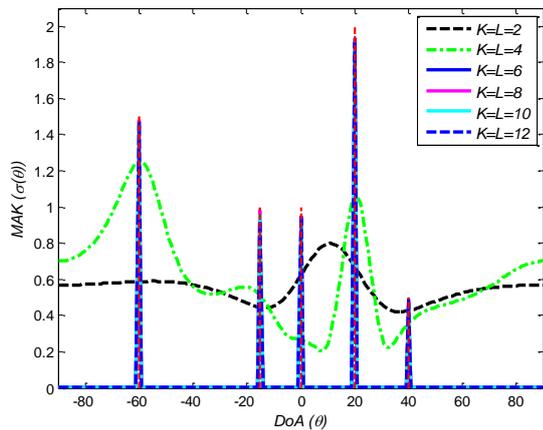
F. Jumlah Elemen Antena Tx-Rx

Untuk mempertimbangkan pengaruh ukuran elemen antena pada kinerja estimator terutama estimator yang diusulkan yaitu FBCapon maka dilakukan pengamatan terhadap berbagai ukuran K dan L pada Tx-Rx radar MIMO. Ukuran K dan L adalah sama dari 2 hingga 12 elemen dengan asumsi Doa dan RCS yang serupa pada pengamatan di Bagian IV E yaitu Θ_f . Tampak pada Gambar 6 bahwa kemampuan estimator FBCapon untuk mendeteksi DoA dan amplitudo target cenderung tepat bila ukuran $K = L$ naik. Pada kondisi $K = L$ yaitu $2 \leq (K = L) < 6$ elemen maka target Θ_f hanya mampu terdeteksi 2 hingga 3 target. Sementara untuk kondisi $(K = L) \geq 6$ maka target Θ_f mampu terdeteksi dengan baik oleh estimator FBCapon baik pada jumlah DoA, MAK, dan resolusinya. Hasil dan analisa ini juga menegaskan bahwa memang benar estimator tersebut tidak berfungsi pada radar PA dan seiring bertambahnya jumlah elemen K dan L maka kemampuan estimator juga meningkat seperti yang ditunjukkan pada kinerja radar MIMO.

V. KESIMPULAN

Makalah ini telah memformulasi dan mengevaluasi estimasi parameter dari deteksi target dengan metode FBCapon. Kinerja estimasi tersebut telah dibandingkan dengan estimasi konvensional seperti LS dan FCapon dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti jenis radar (PA dan MIMO), variasi RCS, banyak DoA, resolusi sudut antara dua target, akurasi deteksi amplitudo, dan jumlah elemen antena di Tx-Rx. Semua

estimator, yaitu LS, FCapon, dan FBCapon, bekerja dengan baik jika diterapkan pada radar MIMO namun tidak dengan radar PA karena hanya estimator LS yang berfungsi mendeteksi ketiga target walaupun MAK memiliki resolusi yang tidak tepat.



Gambar 6. MAK pada radar MIMO khusus estimator FBCapon dengan θ_F dan variasi $K = L$ di Tx-Rx.

Kemampuan deteksi DoA kedua metode Capon lebih akurat dibanding metode LS dimana estimator FBCapon memiliki *RMSE* separuh lebih rendah dari yang diperoleh FCapon. Jumlah DoA yang mampu dideteksi oleh kedua varian Capon lebih rendah dari ukuran jumlah elemen antena di Tx-Rx yaitu K dan L . Resolusi sudut deteksinya lebih baik dari estimator LS, sebagai contoh untuk $K = L = 8$ maka diperoleh resolusi sudut 5° sedangkan estimator LS sebesar $5,8^\circ$. Kemampuan estimator FBCapon untuk mendeteksi DoA dan amplitudo target cenderung tepat bila ukuran $K = L$ naik. Untuk pertimbangan aplikasi dan desain sistem radar terutama ketika berhadapan dengan strong interference dan jamming, kedua varian estimator Capon memiliki resolusi sudut DoA dan MAK yang bagus dan tanpa *sidelobe* sehingga kondisi ini menguntungkan untuk para desainer radar.

REFERENSI

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd edition, McGraw-Hill, New York, USA, 2001.
- [2] J. Li and P. Stoica, *MIMO Radar Signal Processing*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2009.
- [3] M. Hardiwansyah, S. Tahcfulloh, and G. Hendratoro, "Parameter Identifiability of Phased-MIMO Radar," in *Proc. Int. Conf. Artificial Intelligence and Information Technol.*, Yogyakarta, Indonesia, Mar. 2019, pp. 192–195.
- [4] X. Luzhou, J. Li, and P. Stoica, "Target Detection and Parameter Estimation for MIMO Radar Systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 44, no. 3, pp. 927–939, Jul. 2008.
- [5] S. Tahcfulloh and G. Hendratoro, "FPMIMO: A General MIMO Structure with Overlapping Subarrays for Various Radar Applications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 11248–11267, Jan. 2020.
- [6] M. R. Widyantara, Sugihartono, F. Y. Suratman, S. Widodo, and P. Daud, "Analysis of Non Linear Frequency Modulation (NLFM) Waveforms for Pulse Compression Radar," *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, vol. 18, no. 1, pp. 27–34, Aug. 2018.

- [7] S. Tahcfulloh and M. Hardiwansyah, "Parameter Estimation and Target Detection of Phased-MIMO Radar Using Capon Estimator," *Jurnal Elektronika dan Telekomunikasi*, vol. 20, no. 2, pp. 60–69, Dec. 2020.
- [8] S. Tahcfulloh, and G. Hendratoro, "Phased MIMO Radar with Coherent Receive Arrays," in *Proc. International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)*, Bali, Indonesia, May 2017, pp. 72–76.
- [9] C. Gao, H. Zhou, R. Wu, X. Xu, F. Shen, and Z. Guo, "Parameter Estimation and Multi-Pulse Target Detection of Radar MIMO," in *Proc. 2016 IEEE Region 10 Conference*, Singapore, Nov. 2016, pp. 909–914.
- [10] S. Tahcfulloh, "SMIMO Radar: MIMO Radar with Subarray Elements of Phased-Array Antenna," *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 37–44, Jun. 2021.
- [11] J. Capon (1969), "High Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis," *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 8, pp. 1408–1418.
- [12] P. Stoica, H. Li, and J. Li (1999), "A New Derivation of the APES Filter," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 6, no. 8, Aug. 1999.
- [13] H. Li, J. Li, and P. Stoica, "Performance Analysis of Forward-Backward Matched-Filterbank Spectral Estimators," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, no. 7, pp. 1954–1966, Jul. 1998.

PERANCANGAN TEKNOLOGI SEDERHANA UNTUK MEMBANGKITKAN MICROWAVE PLASMA DALAM CAIRAN

Muh. Firdan Nurdin ¹, Andi Erwin Eka Putra ², Novriany Amaliyah ³

¹Jurusan Teknik Mesin, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Indonesia

²Departemen Teknik Mesin, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

¹firdan@borneo.ac.id

²erwinep@eng.unhas.ac.id

³amaliyah_nophie@yahoo.com

Abstract—Plasma technology has interested, especially plasma in liquid which can be applied in the process of gas productions, water treatment, and nanomaterial productions. The purpose of this study is to make a simple technology 2.45 GHz microwave plasma and generate in the variation of liquids such as distilled water, seawater and X-Ray liquid waste by utilizing a microwave oven, as well as to observe the effect of vacuum pressure variations. A microwave oven was modified by integrating a waveguide and a plasma reactor for plasma observation. The results, plasma was generated in distilled water at a vacuum pressure of about 7 kPa, X-Ray liquid waste at a vacuum pressure of about 13 kPa, and seawater at a vacuum pressure of about 34 kPa.

Keywords—2.45 GHz Microwave, Plasma in-Liquid, Plasma Reactor, Waveguide

Intisari—Teknologi plasma telah menarik banyak perhatian terutama plasma dalam cairan yang mana dapat diaplikasikan dalam proses produksi gas, water-treatment, dan produksi nano material. Penelitian ini bertujuan untuk membuat alat pembangkit sederhana 2,45 GHz Microwave Plasma dan membangkitkannya dalam berbagai cairan yakni air destilasi, limbah cairan X-Ray dan air laut, serta melakukan observasi pengaruh variasi tekanan vakum terhadap plasma. Microwave oven dimodifikasi dengan mengintegrasikan pengarah gelombang (waveguide) dan reaktor plasma untuk memudahkan observasi fenomena plasma. Hasil dari penelitian ini, plasma telah dibangkitkan dalam cairan air mineral pada tekanan vakum sebesar 7 kPa, limbah cairan X-Ray pada tekanan 13 kPa dan air laut pada tekanan vakum 34 kPa.

Kata Kunci—2,45 GHz Microwave, Plasma Dalam Cairan, Reaktor Plasma, Waveguide.

I. PENDAHULUAN

Saat ini teknologi plasma telah menarik banyak perhatian. Teknologi ini dapat diaplikasikan secara luas utamanya pada teknologi rekayasa material seperti nanomaterial, Diamond like carbon (DLC), dan material komposit, pengolahan limbah berbahaya seperti cairan medis, dan sintesis air laut menjadi material berguna, serta produksi gas dari hidrokarbon cair [1]–[5]. Plasma dikenal juga sebagai materi fase ke empat setelah fase padat, cair dan gas dimana partikel gas terionisasi. Ionisasi merupakan proses terlepasnya elektron suatu atom atau molekul dari ikatannya. Proses ionisasi dapat dicapai melalui energi pemanasan yang tinggi, high-

voltage dan gelombang mikro [6]. Akibat dari sumber energi tersebut, molekul gas menjadi lebih aktif dan akan berada pada fase plasma. Pada fase plasma, partikel-partikel bergerak bebas termasuk beberapa elektron dan ion yang bermuatan positif yang mana akan bertumbukkan sehingga menimbulkan pancaran foton. Pancaran foton inilah yang merupakan salah satu karakteristik dari plasma [7].

Umumnya, energi high-voltage, dan radiasi gelombang elektromagnetik berupa RF (Radio Frekuensi) 13,56 MHz dan gelombang mikro (microwave) 2,45 GHz digunakan sebagai sumber energi untuk membangkitkan plasma [8]. Gelombang elektromagnetik memiliki kelebihan yakni konsumsi energi yang lebih rendah untuk membangkitkan plasma dibandingkan high-voltage. Gelombang mikro dengan frekuensi 2,45 GHz dapat ditemukan dalam Oven microwave yang biasanya digunakan untuk proses pemanasan makanan. Gelombang mikro tersebut diubah menjadi energi termal yang mana akan dimanfaatkan untuk menghasilkan proses ionisasi dengan menambahkan waveguide dan reaktor plasma.

Beberapa penelitian dalam proses pembangkitan plasma telah dilakukan yakni pembangkitan plasma pada tekanan 1 atmosfer, produksi hidrogen dari bioetanol dan metana klatrat (methane hydrate), produksi nano partikel zinc, dan modifikasi karakteristik material komposit [9]–[13].

Dari penjelasan di atas, plasma dalam cairan merupakan metode yang sangat penting untuk dikembangkan. Oleh karena itu, alat pembangkit plasma dalam cairan dirancang dengan memanfaatkan microwave oven rumah tangga yang mudah didapat dan harga terjangkau. Dengan menggunakan alat sederhana ini, pembangkitan plasma dalam cairan diidentifikasi dengan air destilasi, air laut dan limbah cair X-Ray.

II. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan adalah Oven Microwave Sanyo tipe EM-S10AS Output Power 400 Watt (Gambar 1) sebagai sumber energi gelombang mikro [14]. Plat aluminium dengan tebal 3 mm dengan dimensi lebar 100 mm dan tinggi 100 mm sebagai waveguide.



Gambar 1. Oven Microwave Sanyo tipe EM-S10AS Output Power 400 Watt [14].

Bahan reaktor plasma terdiri dari teflon silinder diameter 56 mm dan 29 mm, Pipa Akriklil diameter 57 mm dan tinggi 140 mm. Aluminium Silinder dengan diameter 30 mm, elektroda tungsten 3 mm (2 buah), manifold dan pressure gauge serta O-ring tahan panas yang digunakan sebagai seal reaktor. Jenis cairan yang digunakan dalam pengambilan data yakni air destilasi, limbah cari X-Ray dan air laut dengan volume 100 ml, masing-masing.

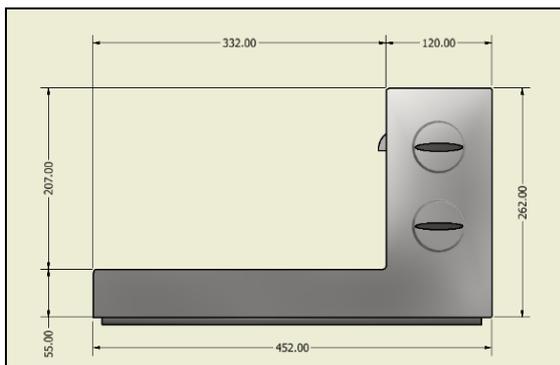
Pelaksanaan penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap untuk mempermudah dan memperjelas arah penelitian, yaitu tahap perancangan (desain) alat, pembuatan atau perakitan alat, pengujian hasil rancangan, pengamatan, dan pengolahan data seperti disajikan pada Gambar 3.1. Tahap perancangan (desain) alat ini menggunakan program *Autodesk Inventor Profesional*. Pada perancangan alat pembangkit 2,45 GHz microwave plasma, terlebih dahulu dilakukan 3 tahap pendekatan desain :

1. Rancangan Fungsional

Alat ini terdiri dari beberapa komponen utama antara lain: microwave oven yang berfungsi sebagai sumber dari gelombang mikro, pengarah gelombang (*waveguide*) yang berfungsi sebagai pengarah gelombang mikro) dan reaktor yang berfungsi sebagai wadah pengamatan timbulnya plasma.

2. Rancangan Struktural

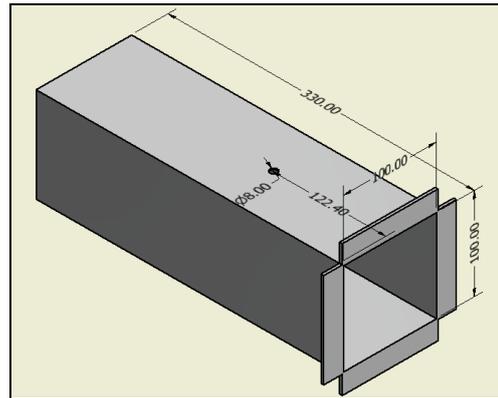
Microwave oven akan dimodifikasi dengan menghilangkan ruang pemanasan (Gambar 2).



Gambar 2. Rancangan Microwave Oven

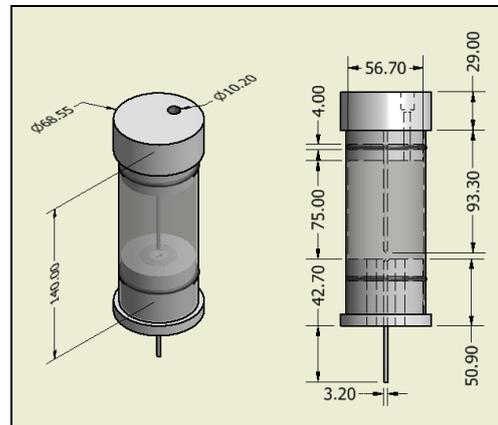
Selanjutnya, *Waveguide* dibuat dari bahan aluminium dengan ukuran lebar 100 mm dan tinggi 100 mm dengan

panjang 330 mm. Terdapat lubang berdiameter 8 mm sebagai *input* elektroda reaktor. Jarak lubang dari magnetron adalah 122 mm (λ dari frekuensi 2,45 GHz). Rancangan dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Rancangan *Waveguide*

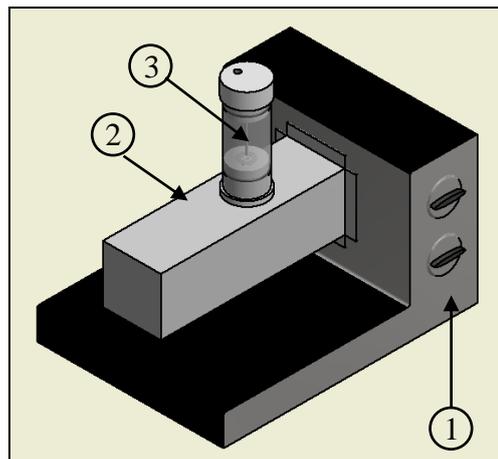
Terakhir, Reaktor Plasma dibuat dari pipa akrilik dengan diameter dalam 55 mm dan tinggi 140 mm. Penutup atas dan bawah terbuat dari bahan Teflon. O-ring ditempatkan sebagai seal penutup (Gambar 4).



Gambar 4. Rancangan Reaktor Plasma

3. Rancangan Akhir

Alat pembangkit 2,45 GHz microwave plasma dirakit dengan menggabungkan ketiga komponen utama tersebut (Gambar 5).



Gambar 5. Rancangan Alat Pembangkit Microwave Plasma 2,45 GHz Microwave Plasma.

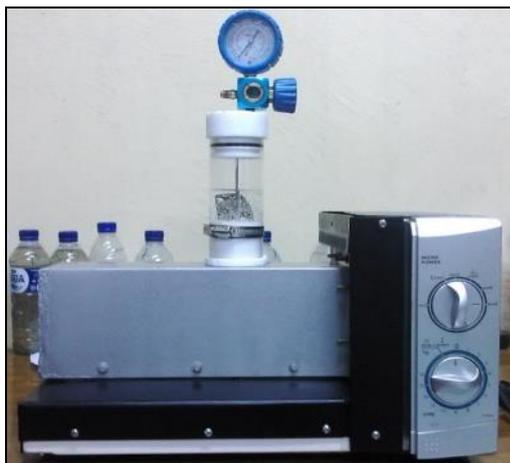
Tabel I
Keterangan Bagian Desain

No. Item	Bagian Alat	Kuantitas
1.	2,45 GHz Microwave Energy Source	1
2.	Waveguide	1
3.	Reaktor Plasma	1

Setelah perancangan desain selesai, dilanjutkan ke tahap pembuatan atau perakitan alat. Setelah itu, alat diuji coba dengan membangkitkan plasma dalam air destilasi yang mana mempertimbangkan variasi dari dua parameter yakni tekanan dan waktu pembangkitan plasma. Setelah plasma dapat terbangkitkan dalam air destilasi, Selanjutnya dilakukan hal yang sama untuk cairan yang berbeda yakni air laut dan limbah cairan X-Ray. Kemudian dilanjutkan ke tahap pengamatan dan pengolahan data mengenai pembangkitan plasma dalam variasi cairan tersebut.

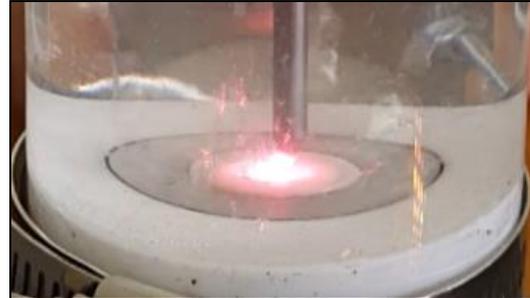
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada perancangan alat pembangkit 2.45 GHz microwave plasma, terdapat tiga komponen utama yaitu oven microwave, pengarah gelombang, dan reaktor plasma. Microwave oven akan dimodifikasi dengan mengganti bagian ruang pemanasan dengan pengarah gelombang dengan tujuan untuk mengoptimalkan penyerapan gelombang mikro oleh elektroda dari reaktor plasma. Pengarah gelombang (waveguide) yang umum digunakan untuk frekuensi 2,45 GHz yakni tipe WG8 dengan jangkauan frekuensi 1,70 – 2,60 GHz [15]. Kemudian dibuat lubang dengan diameter 8 mm dan jarak antara lubang terhadap magnetron sekitar $\lambda = 122$ mm yang mana merupakan kalkulasi dari panjang satu gelombang pada frekuensi 2,45 GHz. Reaktor plasma dibuat sebagai wadah dari sistem pembangkitan plasma dalam cairan. Reaktor ini terbuat dari bahan akrilik sebagai tabung reaktor dan penutupnya terbuat dari bahan teflon. Ketiga komponen kemudian disatukan sesuai dengan rancangan di *Autodesk Inventor* sehingga dihasilkan alat sederhana pembangkitan microwave plasma dalam cairan (Gambar 6) dan selanjutnya dilakukan pengujian.

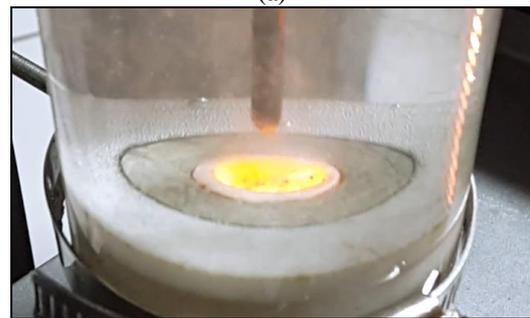


Gambar 6. Alat Microwave Plasma

Pengujian dilakukan dengan power microwave oven sebesar 400 Watt pada tiap tekanan vakum sebesar 95 - 7 kPa (inkremental 7 kPa) dengan waktu 2 menit, masing-masing. Plasma dalam cairan dapat dibangkitkan konstan dalam berbagai jenis cairan (Gambar 7), sementara hasil pengolahan data ditabulasikan pada tabel 2.



(a)



(b)



(c)

Gambar 7. Plasma dalam Cairan Air Destilasi (a), Air Laut (b) dan Limbah Cairan X-Ray (c).

Gambar diatas menunjukkan cahaya tampak yang dihasilkan ketika plasma terbangkitkan dalam cairan; air destilasi (a), air laut (b) dan limbah cairan X-Ray (c), masing-masing berbeda. Hal ini dapat dihubungkan dengan komposisi kimia yang terkandung dalam cairan tersebut. S. Horikoshi dan N. Serpone telah menunjukkan hubungan antara emisi cahaya selama proses ionisasi plasma dalam cairan terhadap komposisi kimia. Mereka membuktikannya melalui emisi spektrum dari cahaya tersebut yang mana memperlihatkan unsur gas hidrogen, nitrogen dan oksigen dalam uap air [16], [17].

Tabel II
Hasil Pengolahan Data Plasma Dalam Cairan

No.	P_{Vacuum} (kPa)	Air Destilasi		Limbah Cair X-Ray		Air Laut	
		$t_{\text{initial generated plasma}}$ (detik)	Ket	$t_{\text{initial generated plasma}}$ (detik)	Ket	$t_{\text{initial generated plasma}}$ (detik)	Ket
1	95	-	Tidak ada	2	Gelembung	2	Gelembung
2	88	-	Tidak ada	2	Gelembung	2	Gelembung
3	81	-	Tidak ada	1	Plasma diskontinyu	2	Gelembung
4	74	-	Tidak ada	1	Plasma diskontinyu	2	Plasma diskontinyu
5	68	-	Tidak ada	1	Plasma diskontinyu	2	Plasma diskontinyu
6	61	-	Tidak ada	1	Plasma diskontinyu	2	Plasma diskontinyu
7	54	-	Tidak ada	1	Plasma diskontinyu	2	Plasma diskontinyu
8	47	30	Gelembung	1	Plasma diskontinyu	2	Plasma diskontinyu
9	40	25	Gelembung	1	Plasma diskontinyu	2	Plasma diskontinyu
10	34	25	Gelembung	1	Plasma konstan	2	Plasma diskontinyu
11	27	23	Plasma diskontinyu	1	Plasma konstan	2	Plasma diskontinyu
12	20	5	Plasma diskontinyu	1	Plasma konstan	2	Plasma diskontinyu
13	13	4	Plasma diskontinyu	1	Plasma konstan	1	Plasma konstan
14	7	3	Plasma konstan	1	Plasma konstan	1	Plasma konstan

Berdasarkan tabel II, plasma terbangkitkan dalam air destilasi, air laut dan limbah cairan rongten pada tekanan vakum 27 kPa – 7 kPa, 88 kPa – 7 kPa, dan 74 kPa – 7 kPa, masing-masing. Dari ketiga jenis cairan tersebut, air laut merupakan cairan yang mana plasma dapat terbangkitkan konstan lebih mudah pada tekanan 34 kPa, sedangkan untuk air destilasi dan limbah rongten pada tekanan 7 kPa. Plasma terbangkitkan konstan, diindikasikan dengan intensitas terbentuknya gelembung yang sangat tinggi sehingga proses ionisasi pun konstan. Sementara waktu awal terbangkitnya plasma rata-rata sekitar 2 detik untuk ketiga jenis cairan tersebut.

Sebelum plasma terbangkitkan dalam ketiga jenis cairan tersebut, karakteristik awal ditandai dengan munculnya gelembung yang mana merupakan proses perubahan fase cair menjadi gas. Kemudian gas tersebut selanjutnya akan terionisasi dan kemudian plasma terbangkitkan. Namun pada tekanan 13 kPa, 40 kPa dan 54 kPa untuk masing-masing ketiga jenis cairan tersebut, plasma terbangkitkan secara diskontinyu. Karakteristik plasma diskontinyu dapat kita simpulkan sebagai fase transisi yang merupakan fase yang terjadi antara fase gelembung dan fase plasma konstan.

Dari penjelasan tabel di atas, dapat kita jelaskan bahwa pembangkitan plasma merupakan fungsi dari tekanan dimana semakin rendah tekanan (tekanan vakum semakin besar) maka waktu yang dibutuhkan untuk

membangkitkan plasma dalam cairan akan semakin cepat. Pengaruh tekanan vakum terhadap pembangkitan plasma dapat dihubungkan dengan fungsi tekanan terhadap suhu yakni titik didih. Seperti yang kita ketahui bahwa semakin rendah tekanan atmosfer, maka semakin rendah titik didih zat cair tersebut. Akibat titik didih zat cair rendah, maka suhu panas laten akan semakin rendah pula sehingga proses ionisasi pun lebih cepat terjadi dan plasma lebih cepat terbangkitkan.

Sesuai dengan penjelasan data di atas, maka tekanan vakum sebesar 7 kPa dijadikan sebagai acuan awal yang mana merupakan tehnik untuk membangkitkan plasma dalam cairan air destilasi pada tekanan 1 atm (101,3 kPa). Tehnik tersebut dilakukan dengan cara menurunkan tekanan sampai pada tekanan dimana plasma terbangkitkan konstan (7 kPa). Setelah plasma terbangkitkan, tekanan vakum 7 kPa akan meningkat hingga mencapai tekanan 1 atm selama beberapa waktu. Kenaikan tekanan tersebut merupakan akibat dari proses ionisasi plasma pada sistem reaktor tertutup. Hasilnya, plasma dapat dibangkitkan di dalam cairan pada tekanan 1 atm dengan waktu yang dibutuhkan 9.43 menit. Pengujian pembangkitan plasma dalam air destilasi pada tekanan 1 atm dilakukan sebagai dasar acuan untuk produksi gas dari cairan.

Dalam penelitian ini, dilakukan kalibrasi energi microwave yang terabsorpsi ke dalam reaktor dengan metode kalorimetrik [7]. Metode ini merupakan dasar

untuk mengkonversi energi microwave ke bentuk energi panas. Energi microwave dikalkulasi melalui panas yang dihasilkan dalam air. Energi yang terserap dalam air dan diasumsikan sebagai energi microwave $P_{mw} = P_{water\ load}$ dimana dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut:

$$P_{mw} = P_{water\ load} = \frac{(m_w \cdot c_w + m_c \cdot c_c)(T_f - T_i)}{t} \quad (1)$$

Dimana, massa air (m_w), panas spesifik air (c_w), massa penampung air (m_c), panas spesifik penampung air (c_c), suhu awal dan suhu akhir air (T_i , T_f), dan waktu selama air terkena radiasi microwave (t). Dengan persamaan ini, maka dapat dihitung energi microwave pada panjang gelombang sebesar 122 mm dari titik magnetron (lubang pada waveguide) dan berikut beberapa parameter yang diperoleh:

m_w	= 1	gram
m_c	= 0,5	gram
c_w	= 1	kal/gr°C
c_c	= 0,2	kal/gr°C
T_i	= 30	°C
T_f	= 54	°C
t	= 20	sekon

maka, energi yang diserap pada air adalah

$$P_{mw} = \frac{(1 \times 1 + 0,5 \times 0,2)(54 - 30)}{20}$$

$$P_{mw} = \frac{(1 + 0,1)(24)}{20}$$

$$P_{mw} = 1 \text{ kal/s} = 4,6 \text{ watt}$$

Berdasarkan hasil di atas, dapat diasumsikan bahwa jumlah energi yang terabsorpsi ke elektroda untuk membangkitkan plasma dalam cairan sebesar 4,6 Watt. Jumlah energi tersebut hanya 1% dari jumlah energi output magnetron sebesar 400 Watt. Oleh karena itu, dibutuhkan pengembangan lebih lanjut untuk mengoptimalkan energi output magnetron.

IV. KESIMPULAN

Alat pembangkit 2,45 GHz microwave plasma ini terdiri dari 3 komponen utama yakni microwave oven 400 watt, pengarah gelombang WG8 dan reaktor plasma kapasitas 342 ml. Pengujian alat pembangkit 2,45 GHz microwave plasma dapat membangkitkan plasma secara konstan dalam cairan air destilasi, air laut dan limbah cair X-Ray pada kondisi tekanan vakum sebesar 7 kPa. Variasi tekanan vakum sangat mempengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk membangkitkan plasma dimana semakin besar tekanan vakumnya (semakin kecil tekanan) maka semakin cepat waktu yang dibutuhkan untuk membangkitkan plasma. Untuk tekanan 1 atm, pembangkitan plasma dalam air destilasi membutuhkan waktu 9,43 menit. Adapun tujuan dibangkitkannya plasma dalam cairan adalah sebagai dasar acuan untuk memproduksi energi gas dari cairan dan nanomaterial.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Universitas Borneo Tarakan yang telah memberikan bantuan dana DIPA dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] S. Nomura et al., "Discharge characteristics of microwave and high-frequency in-liquid plasma in water," *Appl. Phys. Express*, vol. 1, no. 4, pp. 0460021–0460023, 2008, doi: 10.1143/APEX.1.046002.
- [2] A. F. Yong Yang, Young I. Cho, *Plasma Discharge in Liquid: Water Treatment and Applications*. 2012.
- [3] G. Saito and T. Akiyama, "Nanomaterial Synthesis Using Plasma Generation in Liquid," *J. Nanomater.*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/123696.
- [4] S. Horikoshi and N. Serpone, "In-liquid plasma: A novel tool in the fabrication of nanomaterials and in the treatment of wastewaters," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 75, pp. 47196–47218, 2017, doi: 10.1039/c7ra09600c.
- [5] A. Varade, A. Krishna, K. N. Reddy, M. Chellamalai, and P. V. Shashikumar, "Diamond-like Carbon Coating Made by RF Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition for Protective Antireflective Coatings on Germanium," *Procedia Mater. Sci.*, vol. 5, pp. 1015–1019, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.390.
- [6] M. Nur, *Plasma Physics and Applications*. 2011.
- [7] Y. Yang, Y. I. Cho, and A. Fridman, "Plasma Discharge in Water and Its Application for Industrial Cooling Water Treatment," no. June, p. 30, 2011, [Online]. Available: <https://studylib.net/doc/18261981/plasma-discharge-in-water-and-its-application-for>.
- [8] F. F. Chen, "Radiofrequency Plasma Sources for Semiconductor Processing," *Adv. Plasma Technol.*, pp. 99–115, 2008, doi: 10.1002/9783527622184.ch6.
- [9] A. Ryane, A. Oktiawan, W. Syakur, "Penggunaan Teknologi Plasma Dalam Mengurangi Kandungan BOD Pada Limbah Minuman Ringan," pp. 1–6, 2013.
- [10] N. Amaliyah, S. Mukasa, S. Nomura, H. Toyota, and T. Kitamae, "Plasma in-liquid method for reduction of zinc oxide in zinc nanoparticle synthesis," *Mater. Res. Express*, vol. 2, no. 2, p. 25004, 2015, doi: 10.1088/2053-1591/2/2/025004.
- [11] C. Chaichumporn, P. Ngamsirijit, N. Boonklin, K. Eaiprasetsak, and M. Fuangfoong, "Design and Construction of 2.45 GHz Microwave Plasma Source at Atmospheric Pressure," vol. 8, pp. 94–100, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.03.018.
- [12] A. Erwin and E. Putra, "Produksi Bahan Bakar Gas Melalui Dekomposisi Bioetanol," no. Snttm Xiii, pp. 15–16, 2014.
- [13] A. E. E. Putra, S. Nomura, S. Mukasa, and H. Toyota, "Hydrogen production by radio frequency plasma stimulation in methane hydrate at atmospheric pressure," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 21, pp. 16000–16005, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.07.099.
- [14] Sanyo, *INSTRUCTION MANUAL EM-S105AW / AS*. .
- [15] M. R. Hidayat, M. H. Zamzam, and S. U. Prini, "Excitation Analysis of Transverse Electric Mode Rectangular Waveguide," *J. Elektron. dan Telekomun.*, vol. 20, no. 1, p. 1, 2020, doi: 10.14203/jet.v20.1-8.
- [16] S. Horikoshi and N. Serpone, "In-liquid plasma: A novel tool in the fabrication of nanomaterials and in the treatment of wastewaters," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 75, pp. 47196–47218, 2017, doi: 10.1039/c7ra09600c.
- [17] S. Horikoshi, S. Sawada, S. Sato, and N. Serpone, "Microwave-Driven In-liquid Plasma in Chemical and Environmental Applications. III. Examination of Optimum Microwave Pulse Conditions for Prolongation of Electrode Lifetime, and Application to Dye-Contaminated Wastewater," *Plasma Chem. Plasma Process.*, vol. 39, no. 1, pp. 51–62, 2019, doi: 10.1007/s11090-018-9935-x.

PEMANFAATAN DAUN PINUS JARUM UNTUK DIJADIKAN BRIKET BIOCOAL SEBAGAI ENERGI LISTRIK ALTERNATIF

Fitriani Said¹, Herawati²

^{1,2}Universitas Borneo Tarakan Kota Tarakan Provinsi Kalimantan Utara Indonesia

¹fitriani@borneo.ac.id
²heirayeyy@gmail.com

Abstract—Biomass is organic material produced through the photosynthetic process in the form of products or waste. Examples of biomass include plants, trees, grass, agricultural waste, forest waste, feces and livestock manure. This biomass can be used as an alternative fuel to replace petroleum which is suitable for development in Tarakan. One of the abundant sources of biomass is needle pine leaves which are found on the UBT campus, Pesisir Charity Beach and Tarakan City Nursery. The selection of fallen needle pine leaves as biomass in this study was based on the absence of utilization of pine leaf waste. Thus, in this study, dry needle pine leaf waste will be utilized to make briquettes mixed with coal with a variant of adhesive composition. There are 3 types of adhesives used, sago, starch starch and clay. Of the 3 types of adhesives, each sample was tested to obtain the value of moisture content, ash content, heat and electrical energy. Briquettes can be said to be good if they have a water content value below 8% according to SNI. Where the water content in the sago adhesive is in the range of more than 6%, while for starch adhesive it is in the range of 5%-6% and for clay adhesive the value is in the range of 5%-7%. The ash content in this study has met the SNI standard, which is below 8%, but the clay adhesive has an ash content close to 8%, which is 7.95%. The value of voltage and current is influenced by the composition of the sample, where the smaller the percentage of the pine leaf content, the smaller it is, and vice versa. The calorific value is obtained from the analysis of existing data to obtain a large enough heating value, which is in the range of 4500 J.

Keywords—Briquettes, Heat, Convert Heat Energy to electricity

Intisari—Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintetik baik berupa produk maupun buangan. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pepohonan, rumput, limbah pertanian, limbah hutan, tinja dan kotoran ternak. Biomassa ini dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif pengganti minyak bumi yang cocok dikembangkan di Tarakan. Salah satu sumber biomassa yang melimpah adalah daun pinus jarum banyak ditemukan di kampus UBT, Pesisir pantai amal dan Persemaian Kota Tarakan. Pemilihan daun pinus jarum yang berguguran sebagai biomassa pada penelitian ini didasarkan atas belum adanya pemanfaatan sampah daun pinus. Dengan demikian pada penelitian kali ini sampah daun pinus jarum kering akan dimanfaatkan untuk dibuat menjadi briket yang di campur dengan batubara dengan varian komposisi perekat. Varian perekat yang digunakan ada 3 jenis, sago, tepung kanji dan tanah liat. Dari 3 jenis perekat masing-masing sampel diuji untuk mendapatkan nilai kadar air, kadar abu, kalor dan energi listrik. Briket dapat dikatakan baik jika

memiliki nilai kadar air dibawah 8% menurut SNI. Dimana kadar air pada perekat sago diantara kisaran 6% lebih, sedangkan untuk perekat kanji kisaran 5%-6% dan untuk perekat tanah liat mendapatkan nilai kisaran 5%-7%. Kadar abu pada penelitian ini sudah memenuhi standar SNI yaitu dibawah 8%, tetapi pada perekat tanah liat memiliki kadar abu yang mendekati 8% yaitu sebesar 7,95%. Nilai tegangan dan arus dipengaruhi oleh komposisi sampel, dimana semakin kecil persentase kadar daun pinusnya maka semakin kecil, begitu juga sebaliknya. Nilai kalor didapatkan dari hasil analisa data yang ada hingga mendapatkan nilai kalor yang cukup besar yaitu kisaran nilai 4500 J.

Kata Kunci—Briket, Kalor, Konversi Energi Panas Ke listrik

I. PENDAHULUAN

Cadangan minyak bumi dan gas alam semakin berkurang dimana penambang selalu bergerak dari daratan menuju pantai hingga menuju ke dasar laut menggunakan teknologi modern dan ini terjadi secara rutin. Sementara itu permintaan minyak bumi dan gas alam semakin meningkat setiap tahunnya, hal ini yang membuat harga minyak bumi dan gas alam semakin meningkat, dimana subsidi dari pemerintah pun tidak berpengaruh besar terhadap harga yang sudah meningkat, maka dari itu masyarakat perlu melakukan pengolahan limbah yang dapat menghasilkan sumber energi alternatif sebagai pengganti bahan bakar minyak (BBM). Biomassa sangat mudah di temukan dari aktifitas pertanian, peternakan, perikanan dan limbah lainnya. Berbagai bahan biomassa yang dapat dijadikan sebagai bahan bakar bisa di ambil dari aktifitas kehutanan dan pertanian yaitu daun bambu, daun kopi dan daun pinus[9]. Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintetik baik berupa produk maupun buangan [10].

Biomassa ini dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif pengganti minyak bumi yang cocok dikembangkan di Tarakan. Salah satu sumber biomassa yang melimpah adalah daun pinus jarum banyak ditemukan di kampus UBT, Pesisir pantai amal dan Persemaian Kota Tarakan. Pemilihan daun pinus jarum yang berguguran sebagai biomassa pada penelitian ini didasarkan atas belum adanya pemanfaatan sampah daun pinus. Dengan demikian pada penelitian kali ini sampah daun pinus jarum kering akan dimanfaatkan untuk dibuat menjadi briket yang di campur dengan batubara dengan varian komposisi perekat untuk menjadi bahan bakar

alternatif. Dalam penelitian ini pembuatan briket biomassa menggunakan perekat dari tepung kanji, tanah liat dan tepung sagu, karena lebih mudah didapat dan harganya relatif murah. Setelah dijadikan briket kemudian akan diuji nilai kalor yang dimiliki.

Kalor adalah suatu bentuk energi yang diterima oleh suatu benda yang menyebabkan benda tersebut mengalami perubahan temperature. Seiring dengan perkembangan teknologi pada era digital dibutuhkan sumber energi listrik baru yang dapat menopang kebutuhan makhluk hidup. Salah satu energi yang belum dimanfaatkan secara optimal adalah energi kalor. Pemanfaatan energi kalor sebagai pembangkit energi listrik dapat dilakukan dengan menggunakan termoelektrik [11].

II. LANDASAN TEORI

1. Tanaman Pinus

Tanaman pinus dan cemara adalah jenis pohon yang sama sehingga termasuk dalam kategori jenis *coniferous evergreen*. Yang dimaksud dengan *coniferous evergreen* adalah jenis pohon yang tumbuh membentuk kerucut seperti topi ulang tahun dan memiliki daun berwarna hijau dalam keadaan muda sedangkan ketika saat berguguran akan berubah warna menjadi coklat. Untuk jenis pohon yang dijadikan pohon natal dalam buku dan film itu adalah jenis pohon *fir* atau pohon *spruce*. Kedua jenis pohon tersebut termasuk dalam jenis kelompok *familia pinaceae*, tetapi kedua pohon tersebut berasal dari genus yang berbeda, yaitu genus *Cedar* (pohon *fir*) dan genus *Picea* (pohon *spruce*).

A. Habitat

Pohon pinus atau tusam banyak ditemukan atau tumbuh secara bergerombol pada kondisi tanah asam, berpasir dan kondisi tanah yang memiliki serapan air yang baik, pohon pinus juga hidup pada kawasan hutan didaerah dataran tinggi. Pohon pinus atau tusam sangat mudah beradaptasi dengan lingkungannya, bahkan terhadap perubahan cuaca sangat ekstrim. Beberapa jenis pohon pinus dapat tumbuh setelah terjadi kebakaran hutan. Untuk pohon pinus yang dewasa dapat beregenerasi dengan cepat, sedangkan jenis akar pohon pinus adalah akar tunggang dengan sistem perakaran yang dalam dan kuat sehingga cocok tumbuh di tanah dengan tekstur ringan hingga sedang.

B. Morfologi Tanaman Pinus

1) Akar

Akar pada tanaman pinus merupakan akar *radix primaria* (tunggang) tapi juga bercabang-cabang. Struktur akar tanaman pinus sangat kuat, mencengkeram tanah, dan berwarna coklat. Memiliki akar lembaga yang akan terus tumbuh menjadi akar pokok yang bercabang-cabang dan menjadi akar-akar yang lebih kecil. Hal ini menyebabkan daerah perakaran menjadi luas dan jangkauan penyerapan air, unsur hara juga semakin luas.

2) Batang

Tanaman pinus memiliki batang kayu yang sangat keras. Pohon pinus ini jika dilihat dari kejauhan akan tampak seperti berbentuk kerucut atau lima segitiga yang memanjang, ini dikarena batang pohon pinus ini memiliki bagian bawah yang besar dan semakin ke atas sampai

puncaknya mengecil. Bentuk batang pohon pinus ini membulat dan memiliki ujung pohon muda menyerupai piramida, namun ketika sudah tua menjadi lebih melebar dan rata. Arah tumbuh pohon pinus *erectus* yaitu tegak lurus ke atas. Permukaan batang pohon pinus sangat kasar karena kondisinya retak – retak dan permukaan batang berwarna kecoklatan.

3) Daun

Daun pada tanaman pinus termasuk ke dalam daun majemuk. Pada daun pinus ini tidak ada bagian terlebar, karena pangkal dan ujung hampir sama ukurannya. Sedangkan panjang daun sekitar 10-20 cm. Daun pinus memiliki ujung daun berbentuk meruncing, memiliki pangkal daun berbentuk rombang/ rata dengan diselubungi sisik berupa selaput tipis, dan juga memiliki tepi daun berbentuk rata, serta ranting daun berukuran pendek dan berbentuk seperti jarum.

4) Bunga

Bunga pada tanaman pinus termasuk ke dalam bunga berkelamin tunggal atau *unisexualis*. Pinus memiliki bunga yang terbagi menjadi dua, yaitu bunga jantan dan bunga betina. Untuk bunga jantan memiliki bentuk silindris dengan ukuran panjang sekitar 2 cm sampai 4 cm. Sedangkan bunga betina itu sendiri memiliki bentuk kerucut, ujungnya berbentuk runcing, memiliki kulit bersisik, berwarna coklat, dan memiliki biji dimana setiap bakal biji terdapat sayap. Bunga pinus ini pada umumnya berwarna kuning ketika bunga ini masih dalam keadaan muda dan berwarna kecoklatan ketika sudah tua.

5) Buah

Tanaman pinus memiliki buah yang berbentuk kerucut dan ada juga berbentuk silindris, tapi yang sering ditemui yaitu berbentuk silinder. Bentuknya buah pinus yang kerucut seperti pohon natal tapi kecil. Buah pinus mempunyai ukuran panjang buah sekitar 5-10 cm dan lebar buah pinus sekitar 2-4 cm. Buah pinus ini yang sering ditemui pada umumnya berwarna coklat dan termasuk buah semua yang tidak dapat dimakan.

6) Biji

Tanaman pinus memiliki biji berbentuk pipih dan bulat telur (*oval*), pada bagian biji ini dilengkapi dengan sayap yang dihasilkan pada setiap dasar bunga (*receptaculum*) atau dari sisik buah. Pada setiap sisik buah menghasilkan dua biji, dan warna biji Pinus umumnya putih kekuningan.

2. Batu Bara

Batu bara merupakan benda yang berasal dari tumbuhan yang telah mati dan tertimbun dalam cekungan atau lubang yang berisi air dalam waktu sangat lama, hingga mencapai usia jutaan tahun. Hal ini yang menjadi perbedaan antara batubara dengan minyak bumi, karena minyak bumi berasal dari sumber hewani. Banyak faktor yang mempengaruhi dalam proses pembentukan batubara, yaitu besarnya temperatur dan tekanan terhadap tumbuhan mati akan mempengaruhi kondisi lapisan batubara yang terbentuk, termasuk pengayaan kandungan karbon di dalam batubara. Dalam usaha mempermudah pengenalan jenis batubara terbagi menjadi beberapa jenis diantara:

a. Batubara jenis *anthracite*

Batubara jenis *anthracite* menunjukkan ciri-ciri yaitu memperlihatkan struktur kompak, memiliki berat jenis tinggi, berwarna hitam metalik, kandungan bahan mudah

menguap rendah, kandungan abu dan kandungan air rendah, dan mudah dipecah.

b. **Batubara jenis bituminous/subbituminous**

Batubara jenis bituminous/subbituminous menunjukkan ciri-ciri yaitu berwarna hitam agak kompak, kandungan karbon relatif tinggi, kandungan sulfur relatif rendah, kandungan abu dan kandungan air relatif rendah.

c. **Batubara jenis lignite**

Batubara jenis lignite menunjukkan ciri-ciri yaitu berwarna hitam, sangat rapuh, kandungan karbon relatif rendah, kandungan sulfur tinggi, kandungan abu relatif tinggi, dan nilai kalor rendah.

3. Briket

Briket merupakan bahan bakar karbon yang dibentuk melalui proses densifikasi yang diproduksi dari limbah bahan organik (biomassa) dan atau batubara yang masih mengandung sejumlah energi panas. Briket merupakan bahan bakar padat dengan dimensi tertentu yang seragam, diperoleh dari hasil densifikasi (pengempaan) bahan berbentuk curah atau serbuk, berukuran relatif kecil atau tidak beraturan sehingga sulit digunakan sebagai bahan bakar dalam bentuk. Briket merupakan bahan bakar padat yang dapat dibuat dari biomassa dan atau batubara yang mengandung karbon dengan nilai kalor cukup tinggi dan dapat menyala dalam waktu yang lama.

Untuk menghasilkan briket yang baik syaratnya adalah permukaan briket yang halus dan tidak meninggalkan bekas hitam ditangan ketika memegangnya. Selain itu briket sebagai bahan bakar ini juga harus memenuhi beberapa syarat atau kiteria, berikut adalah kiteria yang dimaksud:

- Mudah dinyalakan.
- Tidak mengeluarkan asap.
- Emisi gas hasil pembakaran tidak mengandung racun
- Kedap air dan hasil pembakaran tidak berjamur bila disimpan pada waktu lama.
- Menunjukkan upaya laju pembakaran (waktu, laju pembakaran dan suhu pembakaran) yang baik.

Briket batubara memiliki keunggulan sebagai berikut:

- Murah
- Panas yang tinggi dan kontinu sehingga sangat baik untk pembakaran yang lama
- Tidak beresiko meledak atau terbakar
- Tidak mengeluarkan suara bising serta tidak berjelaga, dan sumber batubara berlimpah.

Dalam proses untuk menghasilkan briket yang baik dan aman, maka briket harus memenuhi beberapa syarat diatas, briket harus diuji kelayakannya. Berikut adalah beberapa hal yang perlu diperhatikan atau yang akan diuji:

1. Kadar air

Kadar air yang terkandung dalam produk dinyatakan sebagai kadar air. Kadar air bahan bakar padat ialah perbandingan berat air yang terkandung dalam bahan bakar padat dengan berat kering bahan bakar padat tersebut. Semakin besar kadar air yang terdapat pada bahan bakar padat maka nilai kalornya semakin kecil, begitu juga sebaliknya [10]. Kadar air dihitung dengan menggunakan persamaan [1]:

$$\% \text{Kadar air} = \frac{a-b}{a} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan:

a = sampel briket (g)

b = sampel briket setelah di oven (g)

2. Kadar abu

Setiap briket yang dihasilkan mempunyai kandungan zat anorganik yang dapat ditentukan komposisinya sebagai berat yang tinggal ketika briket dibakar secara sempurna, zat yang yang tinggal itu biasa disebut dengan abu. Abu berasal dari lempung, pasir dan berbagai macam zat mineral lainnya. Dalam menentukan kadar abu maka persamaan rumus yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\% \text{kadar abu} = \frac{\text{berat abu}}{\text{berat sampel}} \times 100\% \quad (2)$$

Briket dihasilkan dari proses pirolisis, yaitu suatu proses thermal dengan kondisi sedikit atau tanpa adanya oksigen. Untuk memenuhi standar kualitas, briket yang dihasilkan tetap harus dibandingkan dengan SNI 01-6235-2000, dimana kualitasnya dilihat dari beberapa parameter sebagai berikut :

- Kadar air maksimal 8 %
- Kadar abu maksimal 8%

Untuk menghasilkan briket yang baik maka harus memenuhi dua parameter diatas. Dari parameter tersebut akan menghasilkan nilai kalor yang baik karena saling mempengaruhi [5].

4. Perekat

Dalam produksi briket ada dua macam perekat yang biasa digunakan yaitu perekat organik dan perekat anorganik. Bahan pencampur pada pembuatan briket yang dapat merembes kedalam permukaan cara terabsorpsi sebagian ke dalam pori-pori atau celah yang ada, antara lain seperti pati (sagu dan tapioka), dekstrin, tepung beras, tar, dan molasses merupakan pengertian dari bahan organik. Sedangkan bahan perekat anorganik ialah bahan pencampur pada pembuatan briket yang berfungsi sebagai perekat antar permukaan partikel-partikel penyusun briket yang tidak reaktif (inert) dan berfungsi sebagai stabilizer selama pembakaran, antara lain seperti tanah liat [3].

5. Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik

Energi yang paling mudah untuk dikonversikan ke beberapa bentuk energi adalah energi listrik. Selain itu energi listrik dapat dihasilkan langsung dari berbagai bentuk energi tanpa harus melewati bentuk perantara energi lainnya. Maka dari itulah energi listrik sering disebut sebagai *direct energi converter*. Terdapat banyak aplikasi konversi yang dapat dilakukan untuk memproduksi energi listrik, seperti; konversi energi termal menjadi energi listrik, proses konversi energi seperti ini biasanya menggunakan konsep *Seebeck* dengan memanfaatkan termoelektrik [6].

$$P = V \times I \quad (3)$$

Dengan:

P = daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

6. Kalor

Nilai kalor adalah besarnya panas yang diperoleh dari pembakaran suatu jumlah tertentu bahan bakar didalam zat asam, makin tinggi berat jenis bahan bakar, makin tinggi nilai kalor yang diperoleh [10]. Kalor ialah salah satu bentuk energi yang dapat berpindah dari suatu benda ke benda yang lain. Kalor bisa diberikan pada suatu benda dengan menggunakan cara pemanasan dan sebagai salah satu dampaknya yaitu kenaikan suhu benda tersebut. Kalor bisa diambil dari benda dengan cara pendinginan dan sebagai salah satu dampaknya yakni penurunan suhu benda tersebut. Kapasitas kalor ialah jumlah kalor yang diserap oleh benda bermassa tertentu untuk menaikkan suhu sebesar 1 °C. Satuan kapasitas kalor dalam sistem international adalah J/K. Perpindahan kalor juga bisa dihitung besarnya, bisa menggunakan rumus di bawah ini :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \tag{4}$$

Dengan:

Q = banyak kalor yang diterima ataupun dilepas oleh suatu benda (J)

m = massa benda yang menerima ataupun melepas kalor (kg)

c = kalor jenis zat (J/kg °C)

ΔT = perubahan suhu (°C)

7. Hubungan kalor dengan listrik

Kalor merupakan bentuk energi maka dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi maka energi listrik dapat berubah menjadi energi kalor dan juga sebaliknya energi kalor dapat berubah menjadi energi listrik. Dalam pembahasan ini hanya akan diulas tentang hubungan energi listrik dengan energi kalor. Besarnya energi listrik yang diubah atau diserap sama dengan besar kalor yang dihasilkan. Sehingga secara matematis dapat dirumuskan.

$$W = Q \tag{5}$$

Untuk menghitung energi listrik digunakan persamaan sebagai berikut :

$$W = P \cdot t \tag{6}$$

Bila rumus kalor yang digunakan adalah

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \tag{7}$$

maka diperoleh persamaan ;

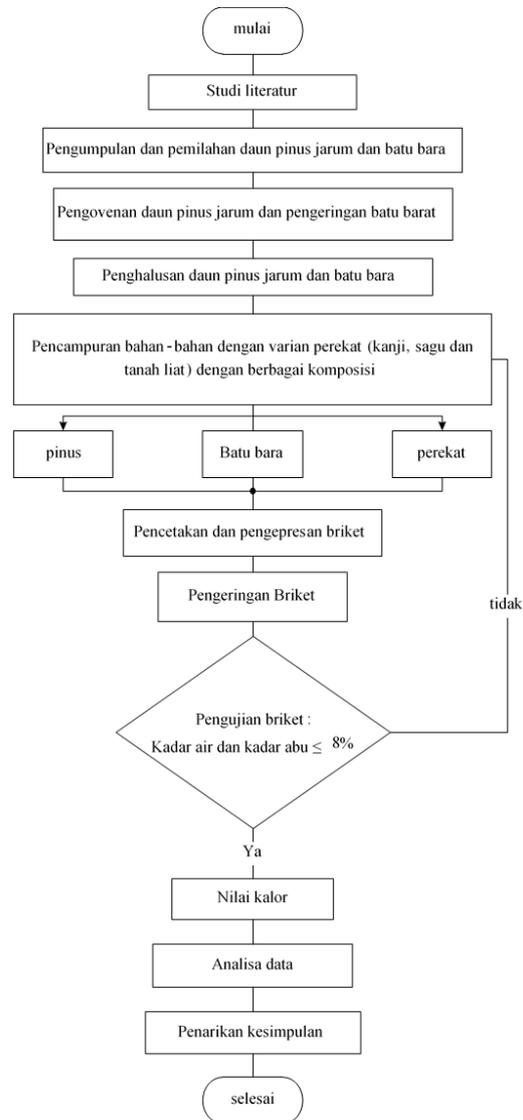
$$P \cdot t = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \tag{8}$$

8. Heatsink

Material yang dapat menyerap dan mendisipasi panas untuk memperluas proses transfer panas dari suatu tempat yang bersentuhan dengan sumber panas dan membuangnya merupakan pengertian dari *heatsink*. Bagian penting dari sebuah sistem termoelektrik generator adalah alat penukar panas atau *heat exchanger*, seperti *heatsink* dan *heatpipe*. *Heatsink* dan *heatpipe* merupakan

bagian yang mutlak diperlukan, karena jika pada bagian sisi panas peltier dapat dipertahankan konstan, maka pada bagian sisi dingin dari elemen peltier akan mampu menyerap panas secara konstan pula.

III. METODE PENELITIAN



IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian kadar air

Perbandingan berat kadar air yang terkandung dalam briket kering dengan berat briket setelah dioven adalah pengertian dari kadar air briket. Semakin kecil nilai kadar air maka semakin bagus nilai kalornya, dimana kadar air briket sangat berpengaruh terhadap nilai kalor. Pengujian kadar air dilakukan sebanyak 9 (sembilan) kali penganalisaan, karena ada 9 sampel yang akan di uji.

$$\% \text{Kadar air} = \frac{48 - 45}{48} \times 100\% = 6,25 \%$$

Sehingga yang dari analisa kadar air diatas maka akan didapatkan data hasil analisa sebagai berikut:

Tabel 1
Hasil analisa kadar air

Jenis konsentrasi	Kadar air		
	Sagu	Kanji	Tanah liat
Pinus 70% dan batu bara 30%	6.25 %	5.56 %	7.14 %
Pinus 50% dan batu bara 50%	6.12 %	6 %	6.95 %
Pinus 30% dan batu bara 70%	6.38 %	6.12 %	5.10 %

Dari data diatas dapat disimpulkan bahwa kadar air yang dimiliki briket sudah memenuhi standar SNI yaitu di bawah 8%. Dimana kadar air pada perekat sagu diantara kisaran 6% lebih, sedangkan untuk perekat kanji kisaran 5%-6% dan untuk perekat tanah liat mendapatkan nilai kisaran 5%-7%. Nilai kadar air ini sangat mempengaruhi untuk nilai kadar abu dan kalor yang dihasilkan. Semakin kecil nilai kadar airnya maka akan mempermudah briket untuk terbakar dan membuat briket semakin ringan.

B. Pengujian Kadar Abu

Abu merupakan bagian yang tersisa dari hasil pembakaran dalam hal ini adalah sisa pembakaran briket. Pengaruhnya kadar abu kurang baik terhadap nilai kalor briket yang dihasilkan. Kandungan kadar abu yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor briket arang sehingga kualitas briket arang tersebut menurun. Kadar abu adalah jumlah sisa anorganik yang dihasilkan dari pengabuan/pemijaran suatu produk.

$$\% \text{Kadar abu} = \frac{3}{48} \times 100\% = 6,25 \%$$

Tabel 2
Hasil analisa kadar abu

Jenis konsentrasi	Kadar abu		
	Sagu	kanji	Tanah liat
Pinus 70% dan batu bara 30%	6,25%	7,4%	7,1%
Pinus 50% dan batu bara 50%	6,7%	7%	7,3 %
Pinus 30% dan batu bara 70%	6,38%	6,7%	7,95%

Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa nilai kadar abu tidak boleh lebih besar dari nilai standar SNI yang ditetapkan. Briket dapat dikatakan baik jika nilai kadar abu lebih kecil dari nilai standarnya yaitu 8%. Dari analisa nilai kadar abu dapat disimpulkan bahwa kadar abu yang dimiliki tiap masing-masing perekat berbeda. Kadar abu yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor briket. Pada pengujian ini memperhitungkan berat abu yang dihasilkan oleh setiap briket. Untuk dimensi yang dihasilkan hanya satu cawan dengan ukuran 1 sendok teh.

C. Pengaruh Suhu Dengan Tegangan

Pada bagian pengukuran suhu ini dilakukan saat mengukur keluaran termoelektrik bertujuan agar mengetahui nilai tegangan dengan suhunya. Pengambilan data melakukan validasi data, validasi data merupakan cara mengetahui data hasil penelitian yang didapat adalah

data yang sudah valid dan asli sesuai data sheet alat yang digunakan. Pada penelitian ini akan menggunakan *Microsoft Exel* untuk mendapatkan grafik *linieritas* dari alat ukur termoelektrik.

Tabel 3
Pengaruh suhu dengan tegangan

Jenis Konsentrasi	Sagu		Kanji		Tanah Liat	
	Th (°C)	V (v)	Th (°C)	V (v)	Th (°C)	V (v)
Pinus 70% dan batu bara 30%	1223	5.14	1169	5.04	69.2	4.21
Pinus 50% dan batu bara 50%	1328	5.32	125	5.19	70	4.23
Pinus 30% dan batu bara 70%	1331	5.33	1328	5.32	79.6	4.39

D. Analisa Nilai Kalor

Kualitasnya sebuah briket dapat ditentukan dengan nilai kalor, semakin tinggi nilai kalor briket, maka semakin baik dan bagus kualitas briket yang akan dihasilkan. Pada penelitian ini pengujian nilai kalornya dengan cara menggunakan termoelektrik, dimana keluaran dari termoelektrik berupa energi listrik.

$$Q = 0,048 \text{ kg} \times 900 \text{ J/kg} \text{ } ^\circ\text{C} \times (122,3-31) \text{ } ^\circ\text{C} \\ = 3944,16 \text{ J}$$

Tabel 4
Analisa nilai kalor

Jenis konsentrasi	Nilai Kalor		
	Sagu	kanji	Tanah liat
Pinus 70% dan batu bara 30%	3944.16 J	4189.32 J	3457.44 J
Pinus 50% dan batu bara 50%	4533.48 J	4230 J	4140 J
Pinus 30% dan batu bara 70%	4339.98 J	4507.02 J	4286.52 J

E. Hubungan Antara Kalor dengan Listrik

Berdasarkan maka hasil analisis dan pembahasan yang telah diuraikan diatas, dapat disimpulkan bahwa komposisi tiap sampel berpengaruh terhadap besar kalor, perbedaan komposisi dan jenis perekat akan menyebabkan perbedaan kalor yang dihasilkan untuk sumber energi listrik yang sama. Hubungan antara kalor ke listrik ialah, dapat mengkonversikan nilai kalor ke listrik dengan persamaan $W = Q$.

$$P = V \cdot I \\ P = 5,14 \times 0,514 \\ P = 2,64196 \text{ watt}$$

Tabel 5
Hubungan antara kalor dengan daya

Jenis Konsentrasi	Sagu		Kanji		Tanah Liat	
	P	t(j)	P	t(j)	P	t(j)
Pinus 70% dan batu bara 30%	2,64196	0.24.58	2,54016	0.27.25	1,77241	0.32.47
Pinus 50% dan batu bara 50%	2,83024	0.26.6	2,69361	0.26.3	1,78929	0.38.32
Pinus 30% dan batu bara 70%	2,84089	0.25.31	2,83024	0.26.32	1,92721	0.36.53

Dari data daya dan waktu pembakaran maka akan melakukan analisa energi listrik pada tiap sampel yang ada. Berikut merupakan analisa energi listrik menggunakan persamaan

$$W = P \cdot t$$

$$W = 2,64196 \times 1498$$

$$W = 3957,66 \text{ J}$$

Tabel 6
Hasil analisa energi listrik

Jenis konsentrasi	Sagu		Kanji		Tanah Liat	
	Q	W	Q	W	Q	W
Pinus 70% dan batu bara 30%	3944.16 J	3957.66 J	4189.32 J	4178.56 J	3457.44 J	3486.33 J
Pinus 50% dan batu bara 50%	4533.48 J	4432.16 J	4230 J	4210.11 J	4140 J	4136.84 J
Pinus 30% dan batu bara 70%	4339.98 J	4349.4 J	4507.02 J	4505.74 J	4286.52 J	4264.92 J

Dari hasil analisa data dapat disimpulkan bahwa nilai energi listrik yang didapatkan hasilnya tidak jauh berbeda dengan hasil analisa kalor. Nilai energi listrik yang didapatkan hingga mencapai 4500 J.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan :

1. Briket dapat dikatakan baik jika memiliki nilai kadar air dibawah 8% menurut SNI. Dimana kadar air pada perekat sagu diantara kisaran 6% lebih, sedangkan untuk perekat kanji kisaran 5%-6% dan untuk perekat tanah liat mendapatkan nilai kisaran 5%-7%.
2. Kadar abu pada penelitian ini sudah memenuhi standar SNI yaitu dibawah 8%, tetapi pada perekat tanah liat memiliki kadar abu yang mendekati 8% yaitu sebesar 7,95%.
3. Nilai tegangan dan arus dipengaruhi oleh komposisi sampel, dimana semakin kecil persentase kadar daun pinusnya maka semakin kecil, begitu juga sebaliknya.
4. Nilai kalor didapatkan dari hasil analisa data yang ada hingga mendapatkan nilai kalor yang cukup besar yaitu kisaran nilai 4500 J.
5. Penggunaan batu bara muda pada penelitian ini disebabkan karena lebih mudah untuk ditemukan, sedangkan jika menggunakan batu bara tua akan lebih

sulit untuk mendapatkannya, yang biasanya hanya terdapat di area pertambangan.

REFERENSI

- [1] Addina, K. N., and Lazulva. "Potential of Bio-briquette of Pineapple Crown Waste (Ananas comosus (L.))" Indonesian Journal of Chemical Science and Technology (IJCST) 2.1(2018): 84-89.s
- [2] Amin, A. Z., Pramono, and Sunyoto. "Pengaruh Variasi Jumlah Perekat Tepung Tapioka terhadap Karakteristik Briket Arang Tempurung Kelapa." Saintekno: Jurnal Sains dan Teknologi 15.2 (2017): 111-118.
- [3] Anizar, Heny, Evi S., and Sonia S. "Pengaruh Bahan Perekat Tapioka Dan Sagu Terhadap Kualitas Briket Arang Kulit Buah Nipah." Perennial 16.1 (2020): 11-17.
- [4] Barus, Kasta Efrata, Achwil Putra Munir, and Sulastri Panggabean. "Pembuatan Briket Dari Sekam Padi Dengan Kombinasi Batubara" (Briquetting of Rice Husk With a Combination of Coal)." Jurnal Rekayasa Pangan dan Pertanian 5.2(2017):397-401.
- [5] Dwiga, Rahman Syarif. Studi Karakteristik Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik Menggunakan Termoelektrik Dengan Larutan Urea Sebagai Media Penyimpan Energi Panas. Diss. Universitas Andalas, 2017. Ependi, Selamat. "Pengembangan Perangkat Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik." (2016).
- [6] Hiendro, A., & Suryadi, D. Perancangan Dan Pengujian Sistem Pembangkit Listrik Berbasis Termoelektrik Dengan Menggunakan Kompor Surya Sebagai Media Pemusat PANAS. Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura,(2019) 2(1).
- [7] Jahiding, M., E. S. Hasan, and A. S. Gangganora. "Pengembangan Briket Batubara Muda (Brown Coal) Sebagai Bahan Bakar Alternatif Berkalori Tinggi." Jurnal Aplikasi Fisika 10.1 (2016).
- [8] Kunlestiowati, H. "Analisis penyimpangan konversi energi listrik menjadi kalor pada perangkat eksperimen Hukum Joule." JRPKF UAD 5.1 (2018): 34-39
- [9] Ningsih, E., Mirzayanti, Y. W., Himawan, H. S., & Indriani, H. M. (2016). Pengaruh Jenis Perekat pada Briket dari Kulit Buah Bintaro terhadap Waktu Bakar. In Seminar Nasional Teknik Kimia Kejuangan (p. 3).
- [10] Mirmawati, M. (2012). Pengaruh konsentrasi Perekat Getah Pinus terhadap Nilai Kalor Pembakaran Biobriket Campuran Sekam Padi dengan Tempurung Kelapa (Doctoral dissertation, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar).
- [11] Putra, F. R. J. (2019). Penyimpanan Energi Listrik Dari Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik Menggunakan Thermoelectric Generator.
- [12] Puspita, S. C., Sunarno, H., & Indarto, B. (2017). Generator termoelektrik untuk pengisian aki. JFA (Jurnal Fisika dan Aplikasinya), 13(2), 84-87.
- [13] Putri, R. E., & Andasuryani, A. (2017). Studi Mutu Briket Arang Dengan Bahan Baku Limbah Biomassa. Jurnal Teknologi Pertanian Andalas, 21(2), 143- 151.
- [14] Rhaharjo, A. C. (2019). Pemanfaatan Limbah Batang Singkong Dengan Penambahan Batubara Sebagai Briket Menggunakan Perekat Tapioka.
- [15] Suluh, S. (2019). Studi Eksperimen Pemanfaatan Limbah Daun Bambu, Daun Kopi Dan Daun Pinus Sebagai Bahan Bakar Alternatif. Mechanical Engineering Science (MES), 1(1), 18-23.

IMPLEMENTASI AUTO VOLTAGE REGULATOR PADA SISI BEBAN ENERGI LISTRIK

Nur liya¹, Abdul Muis Prasetya²

^{1,2} Jurusan Teknik Elektro Universitas Borneo Tarakan, Kalimantan Utara

¹05nurliya@gmail.com

²prasetya.electric@gmail.com

Abstract— *Electrical energy is one of the basic needs in the present era, most human activities require electrical energy, so an increase in the need for electrical energy also increases, resulting in increased system problems. Voltage instability can also result in system problems and poor quality of electrical power. With a protection system, devices related to electricity will be safe and avoid damage. Auto Voltage Regulator is used to improve the voltage value at the point where the tool is installed. Auto Voltage Regulator (AVR) which is often used is a type of autotransformer. In this study, the PWM (Pulse Width modulation) dimmer is implemented as an AVR. Dimmer is an electronic circuit that modifies the form of a pure AC (Alternative Current) signal into a modulated signal so that the output voltage can be adjusted. The results of the test by providing a variety of different voltage input values. The system is obtained by providing an input value of 195 with a system output of 194, but if the system is given an input above the Set Point, the system is able to reduce the voltage up to 220 volts.*

Keywords— *Voltage instability, Automatic Voltage Regulator (AVR), electrical energy.*

Intisari— Energi listrik merupakan satu dari kebutuhan pokok di era sekarang, sebagian besar aktifitas manusia membutuhkan energi listrik, Maka peningkatan akan kebutuhan energi listrik pun bertambah, mengakibatkan permasalahan pada sistem bertambah. Ketidakstabilan pada tegangan dapat mengakibatkan pula permasalahan pada sistem dan buruknya kualitas daya listrik. Adanya sistem proteksi maka perangkat yang berhubungan dengan listrik akan menjadi aman dan terhindar dari kerusakan. Auto Voltage Regulator digunakan untuk memperbaiki nilai tegangan pada titik dimana alat itu dipasang. Auto Voltage Regulator (AVR) yang sering digunakan merupakan tipe autotransformator. Pada penelitian ini mengimplementasikan dimmer PWM (Pulse Width modulation) sebagai AVR. Dimmer merupakan rangkaian elektronika yang memodifikasi bentuk sinyal AC (Alternative Current) murni menjadi sinyal termodulasi sehingga tegangan keluaran dapat diatur. Hasil dari pengujian dengan memberikan berbagai macam nilai masukan tegangan yang berbeda-beda. Didapatkan sistem dengan memberikan nilai input sebesar 195 dengan keluaran sistem juga sebesar 194, tetapi bila sistem diberikan masukan diatas Set Point maka sistem mampu menurunkan tegangan sampai dengan 220 volt.

Kata Kunci— *Ketidakstabilan tegangan, Automatic Voltage Regulator (AVR), energi listrik.*

I. PENDAHULUAN

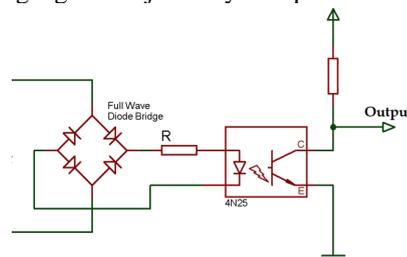
Auto Voltage Regulator digunakan untuk memperbaiki nilai tegangan pada titik dimana alat itu dipasang. *Auto Voltage Regulator* (AVR) pada dasarnya merupakan sebuah *autotransformator* dengan banyak tap pada sisi sekundernya. Komponen utamanya adalah mekanisme tap *changing* dan pengendaliannya. Tiap *Auto Voltage Regulator* (AVR) biasanya dilengkapi oleh peralatan yang bisa mengendalikan perubahan tap secara otomatis berdasarkan tegangan yang masuk walaupun pada saat itu *Auto Voltage Regulator* (AVR) dalam keadaan berbeban[1]. Tetapi desain atau peralatan tersebut membutuhkan ruang yang besar dengan kata lain bentuk dari AVR memiliki *body* yang cukup besar.

Dimmer merupakan rangkaian elektronika yang memodifikasi bentuk sinyal AC (*Alternative Current*) murni menjadi sinyal termodulasi sehingga tegangan keluaran dapat diatur. *Dimmer* yang lebih kompleks menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*) sebagai pengendalinya. *Dimmer* PWM ini mampu menghasilkan tingkatan daya yang kecil sebesar, 0.025 Watt sehingga pengendalian menjadi lebih presisi. Berdasarkan permasalahan yang diuraikan pada paragraf sebelumnya maka peneliti akan mendesain alat AVR dengan menggunakan *dimmer*. Dimana desain AVR dengan menggunakan *dimmer* lebih kecil dibandingkan dengan tipe *autotransformator*

II. LANDASAN TEORI

A. Zero Crossing Detector

Zero crossing detector adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi gelombang sinus AC 220 Volt saat melewati titik nol. Seberangan titik nol yang dideteksi adalah peralihan dari positif menuju negatif dan peralihan negatif menuju positif [2][3]. Rangkaian *zero crossing* berfungsi untuk mengkonversi sinyal sinusoidal arus dan tegangan menjadi sinyal step.



Gambar 1. Rangkaian Zero Crossing

B. Dimmer

Dimmer adalah rangkaian elektronik yang memodifikasi bentuk sinyal ac murni menjadi sinyal terpotong-potong sehingga daya keluaran bisa diatur. Pemotongan sinyal ac ini berguna sebagai peredup lampu, memperlambat motor, mengatur pemanasan dan lainnya. *Dimmer* yang lebih kompleks menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*) sebagai pengendalinya. PWM bisa dihasilkan oleh rangkaian SCR, chip/IC PWM atau mikrokontroler. *Dimmer* PWM ini mampu menghasilkan tingkatan daya yang kecil, sehingga pengendalian menjadi lebih presisi. *Dimmer* PWM bisa dikategorikan menjadi dua macam yaitu:

1) **Penyalan berdasarkan titik nol.**

Waktu penyalan bergantung pada saat sinyal menyentuh nilai nol. Maka dibutuhkan mekanisme untuk mendeteksi waktu sinyal tersebut bernilai 0. Komponen *Silicon Controller Rectifier* (SCR) memiliki sifat *forward blocking*, *forward conduction*, dan *reverse blocking*, maka komponen ini cocok digunakan sebagai *dimmer* elektronik. Pada aplikasi *dimmer digital*, perlintasan titik nol harus dideteksi terlebih dahulu sebelum melakukan penyalan, Pendeteksian nilai nol bisa dilakukan dengan rangkaian *zero crossing detector*.

2) **Penyalan Bebas**

Waktu penyalan *dimmer* tidak dipengaruhi oleh nilai nol, pengaturan *dimmer* PWM lebih diutamakan pada frekuensi PWM-nya. *Dimmer* lampu akan terlihat berkedip jika frekuensi tidak sama. Untuk mengatasi permasalahan tersebut rangkaian peredup lampu (*dimmer*) didesain dengan penggunaan frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi sinyal AC tanpa memperhatikan waktu nol dan nilai frekuensinya.

III. METODE PENELITIAN

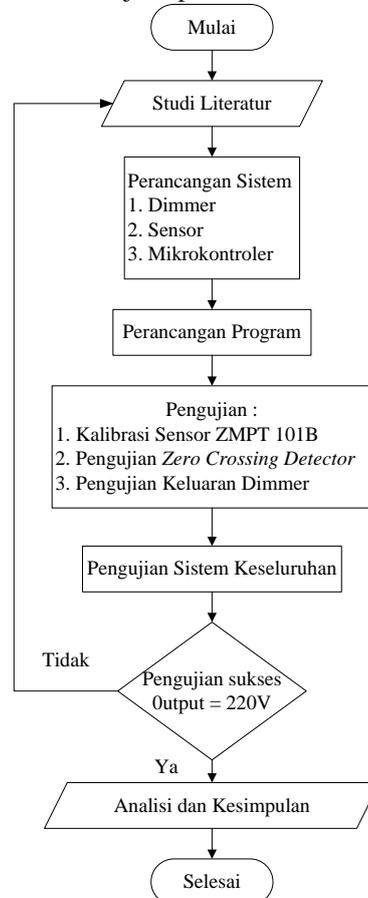
A. Metode Penelitian

Pada penelitian ini melakukan beberapa metode diantaranya ialah :

1. Studi Literatur yaitu mengumpulkan beberapa literatur yang berkaitan dengan dengan penelitian ini diantaranya jurnal-jurnal ilmiah, buku referensi dan sumber-sumber lainnya.
2. Perancangan sistem AVR (*Auto Voltage Regulator*). Pada metode ini memfokuskan peneliti untuk merancang dari sistem AVR. Perancangan sistem terdiri dari alat-alat yang dibutuhkan dan dihubungkan dimulai dari dimmer, sensor dan mikrokontroler.
3. Perancangan program mengenai alat AVR (*Auto Voltage Regulator*), pada perancangan program peneliti menggunakan mikrokontroler dimana program yang digunakan Bahasa program yang sekiranya dimengerti oleh sistem dan tepat.
4. Pengujian pertama yaitu menguji *hardware* yang digunakan. Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui apakah *hardware* dalam kondisi bagus, dapat difungsikan dengan baik untuk sistem AVR.
5. Pengujian terakhir menggabungkan hardware sesuai dengan sistem dan dilakukan pengujian keseluruhan untuk mengetahui apakah sistem sudah sesuai dengan tujuan dari penelitian yang dilakukan. Analisis hasil pengujian melakukan analisis hasil pengujian untuk

memperoleh kinerja sistem secara keseluruhan dan mengklarifikasi hasil tersebut terhadap tujuan yang telah ditetapkan. Apabila belum memenuhi tujuan maka perlu dikaji lebih lanjut

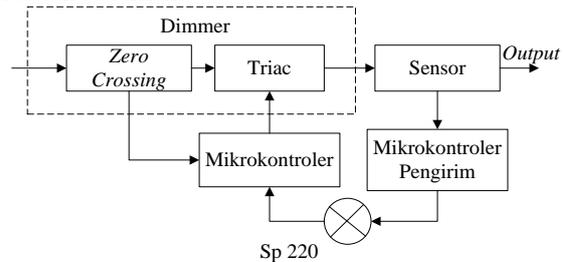
6. Mengenai gagasan alternatif agar tujuan yang telah ditetapkan dapat dicapai.
7. Penarikan kesimpulan jika hasil evaluasi menunjukkan bahwa tujuan penelitian telah tercapai maka akan ditarik kesimpulan untuk menegaskan bahwa gagasan yang diusulkan berhasil menyelesaikan permasalahan dan memenuhi tujuan penelitian.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

B. Perancangan Sistem

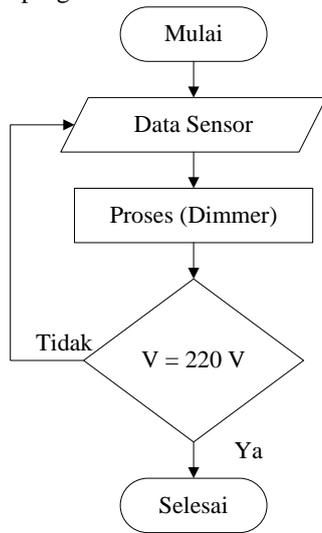
Gambar 3 merupakan diagram blok sistem perancangan peralatan sederhana :



Gambar 3. Diagram blok perancangan sistem

Sistem diatas merupakan gambaran umum dari perancangan alat dimana komponen utama dari sistem merupakan dimmer yang terdiri dari *zero crossing detector* dan Triac. Tegangan awal akan langsung diinputkan pada dimmer bila output dari dimmer belum sesuai dengan *setpoint* terbaca melalui sensor tegangan yang dipasang

pada output dimmer dan data tersebut akan dikirim pada mikrokontroler utama hasil dari data tersebut akan menjadi nilai error untuk menjadi inputan dimmer dan dimmer akan menurunkan nilai tegangan hal ini akan berlanjut sampai nilai tegangan yang diinginkan. Pada gambar 4 merupakan diagram alir dari program



Gambar 4. Diagram alir program

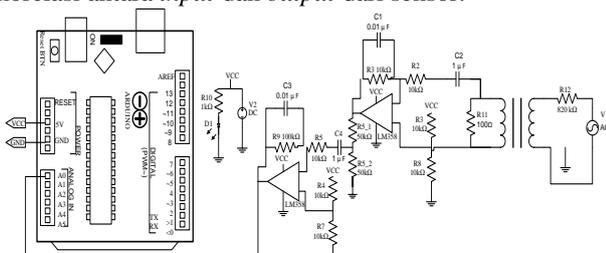
Program dari sistem belum menggunakan metode. Data yang dimaksud pada gambar yaitu pembacaan dari sensor ZMPT101B. Proses melakukan pengolahan data dari sensor, data yang diterima akan menjalankan dimmer untuk menurunkan nilai tegangan ketika belum mencapai 220 V maka akan diproses ulang sampai dengan tegangan 220 V dan selesai.

C. Tahapan Pengujian

Dalam penelitian ini memiliki beberapa pengujian. Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui tingkat keberhasilan alat yang dibuat. Adapun persamaan yang digunakan sebagai berikut. Beberapa pengujian yang dilakukan sebagai berikut:

1) Kalibrasi dan Pengujian Sensor Tegangan

Sensor yang dapat bekerja dengan baik yaitu sensor yang memiliki sifat linieritas yang baik, artinya nilai *output* dari sensor akan naik ataupun turun sesuai dengan naik atau turunnya *input* dari sensor. Untuk menentukan tingkat linieritas sensor dapat dilakukan dengan mencari koefisien korelasi antara *input* dan *output* dari sensor.

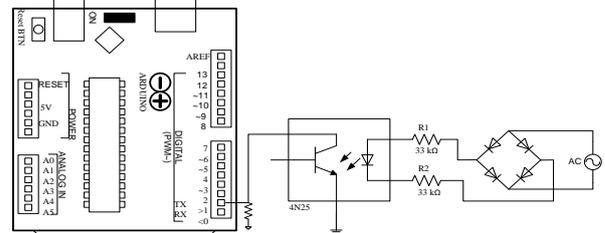


Gambar 5. Rangkaian sensor

2) Pengujian Zero Crossing Detector

Zero crossing detector merupakan rangkaian elektronik yang berfungsi untuk mendeteksi persilangan nol yang ada pada tegangan AC. Rangkaian *Zero Crossing Detector* akan memberikan output berupa pulsa sempit pada saat terjadi persilangan nol pada tegangan AC yang di deteksi.

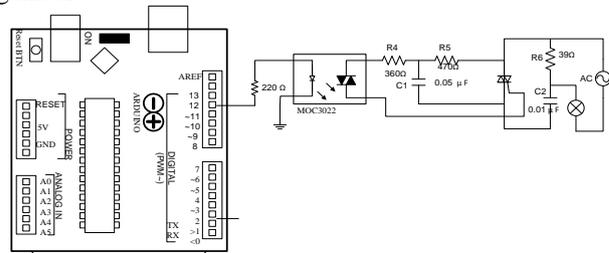
Rangkaian *zero crossing detector* berfungsi untuk mendeteksi perpotongan gelombang sinus dengan *zero point* pada tegangan AC, sehingga dapat menentukan waktu acuan pada *TRIAC* dan menentukan posisi perubahan tegangan. Dengan menggunakan rangkaian *Zero crossing detector* ini, kita dapat mendeteksi zero point sekaligus mengubah suatu sinyal sinusoida menjadi sinyal kotak. Perpotongan titik nol yang terdeteksi adalah pada saat peralihan dari siklus positif menuju siklus negative dan peralihan dari siklus negative menuju siklus positif. Sinyal acuan (*zero point*) akan digunakan sebagai interupsi eksternal mikrokontroler dan selanjutnya mikrokontroler akan mengatur dan membangkitkan sinyal PWM untuk memicu gate *TRIAC*.



Gambar 6. Skematik Pengujian Zero Crossing Detektor

3) Pengujian keluaran *dimmer*

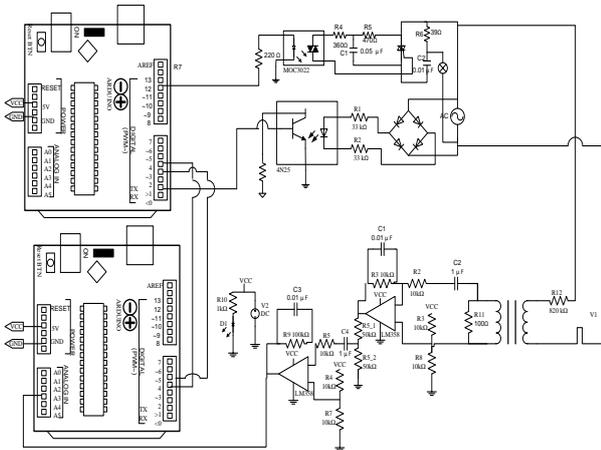
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui keluaran sinyal *dimmer* pengaruh terhadap frekuensi dan tegangan sinyal keluaran. Rangkaian pengujian dimmer terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian Pengujian Dimmer

4) Pengujian sistem secara keseluruhan

Dalam pengujian keseluruhan yang di maksud ialah pengujian keluaran AVR (*Auto Voltage Regulator*) terhadap beban lampu. Pengujian ini diharapkan AVR (*Auto Voltage Regulator*) dapat menurunkan tegangan dengan frekuensi 50 Hz dan gelombang sinus. Pengujian ini menggunakan multimeter digital dan membandingkannya dengan *output*.



Gambar 8. Rangkaian Pengujian Keseluruhan

No	Tegangan Input (V)	Tegangan peak to peak (V)
22	205	595
23	210	597
24	215	599
25	220	601
26	225	602
27	230	605
28	235	607
29	240	608
30	245	609
31	250	611

Berdasarkan tabel didapatkan grafik linieritas sensor tegangan dan persamaan linieritas dari sensor dengan menggunakan Microsoft Exel. Dalam pengujian linieritas variabel yang dicari adalah tegangan input terhadap tegangan output sensor tegangan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pada bab ini didapatkan dari metode penelitian yang telah dilakukan terhadap rancangan alat untuk mengetahui apakah tujuan dari perancangan alat dari sistem dapat berjalan dengan baik.

A. Kalibrasi dan Pengujian Sensor Tegangan

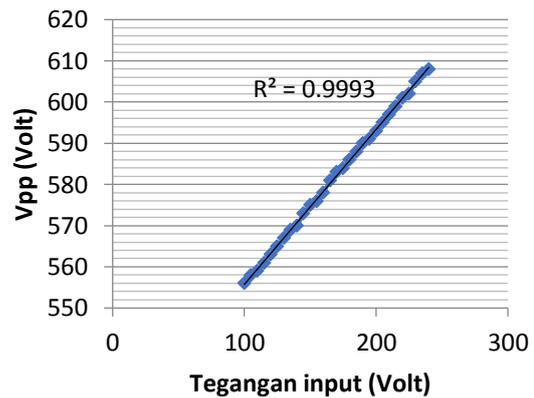
Dalam membuat sebuah alat digital, sensor-sensor yang digunakan terlebih dahulu dikalibrasi. Sensor yang dapat bekerja dengan baik yaitu sensor yang memiliki sifat linieritas yang baik, artinya nilai output dari sensor naik maupun turun sesuai dengan inputan. Untuk mencari tingkat linieritas dapat dilakukan dengan mencari koefisien korelasi antara input dan output sensor menggunakan metode *regresi Linier*.

1) Kalibrasi Sensor

Pada tahapan kalibrasi sensor dengan memberikan tegangan yang bervariasi ke sensor. 100V-250V tegangan bolak-balik dengan step tetap yaitu 5V. Hasil yang didapatkan sebagai berikut.

Tabel 1
Tabel kalibrasi sensor

No	Tegangan Input (V)	Tegangan peak to peak (V)
1	100	556
2	105	558
3	110	559
4	115	561
5	120	563
6	125	565
7	130	567
8	135	569
9	140	571
10	145	573
11	150	575
12	155	576
13	160	578
14	165	581
15	170	583
16	175	584
17	180	586
18	185	588
19	190	590
20	195	591
21	200	593



Gambar 9. Grafik Linieritas Sensor Tegangan

Dari gambar 9 dapat dilihat nilai R^2 atau nilai korelasi untuk sensor tegangan adalah 0.9992, memiliki tingkat hubungan linieritas yang sangat tinggi. Dikatakan nilai linieritas sangat rendah dikarenakan nilai hubungan atau korelasi antara dua variabel yang dibandingkan antara pembacaan dari sensor dan tegangan input memiliki nilai korelasi antara 0.8 sampai dengan 1. Berdasarkan grafik dengan persamaan $y = 0.3763x + 518.11$, digunakan untuk mengakses sensor.

2) Pengujian Sensor Tegangan

Pengujian ini dilakukan dengan mengukur tegangan dengan mengubahnya dari tegangan 150V-250V, dengan membandingkan hasil pengukuran dari sensor terhadap Voltmeter digital. Hasil pengujian pada tabel 2.

Tabel 2

Data hasil pengujian sensor tegangan

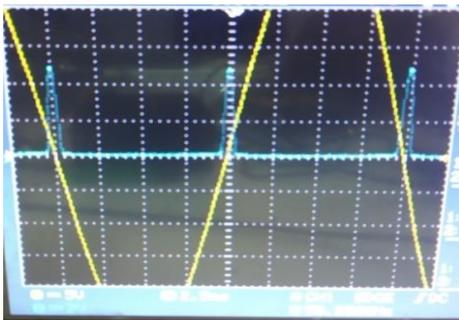
No	Voltmeter (V)	Sensor (V)	Error (%)
1	152	152	0
2	160	160	0
3	170	170	0
4	181	181	0
5	190	190	0
6	200	201	0.497
7	210	211	0.473

8	221	222	0.450
9	230	230	0
10	240	241	0.41
11	251	251	0
Rata-rata			0.181

Nilai presentasi kesalahan (*Error*) dalam pengujian sensor tegangan tersebut dengan *error* rata-rata adalah 0.181% sehingga sensor tegangan yang sudah dikalibrasi dapat digunakan.

B. Pengujian Zero Crossing Detector

Pengujian ini untuk memastikan *Zero Crossing Detector* pada rangkaian bekerja dengan baik dengan menampilkan gelombang output dari rangkaian. Dapat dilihat pada gambar 10.

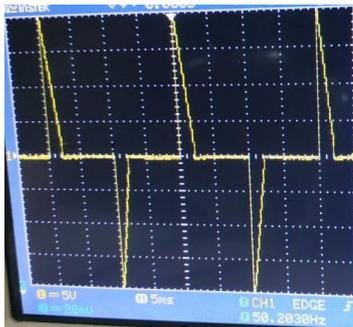


Gambar 10. Gelomban *zero crossing detector* dan sinusoidal 220 Volt

Pada gambar diatas *zero crossing* ditunjukkan pada gelombang berwarna biru dan berwarna kuning merupakan tegangan AC. *Zero crossing* mencari persilangan nol dengan tegangan 5 VDC, frekuensi 50 Hz. *Zero crossing detector* mendeteksi persilangan nol setiap setengah gelombang.

C. Pengujian Keluaran Dimmer

Pengujian Dimmer disini dengan mengubah-ubah nilai PWM dan mengukur outputnya dengan osiloskop. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui apakah output dari dimmer sudah bekerja dengan baik dengan menghitung nilai frekuensi dan tegangan dimmer dari gelombang output osiloskop. Adapun hasil pengujian sebagai berikut.



Gambar 11. Output dimmer *duty cycle* 45%

Menghitung nilai periode dengan :

$$T = \sum \text{kotak Horizontal} \times \text{Time/div}$$

$$= 4 \times \frac{5}{1 \times 10^{-3}}$$

$$= 0.02$$

Menghitung nilai frekuensi dengan :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.02} = 50 \text{ Hz}$$

Menghitung nilai tegangan puncak ke puncak:

$$V_{pp} = \sum \text{kotak Vertikal} \times \text{Volt/div}$$

$$= 8 \times 50$$

$$= 400 \text{ V}$$

Menghitung nilai tegangan puncak dengan :

$$V_p = \frac{V_{pp}}{2} = \frac{400}{2} = 200 \text{ V}$$

Menghitung nilai tegangan asli dengan :

$$V_{rms} = V_p \times \sqrt{2}$$

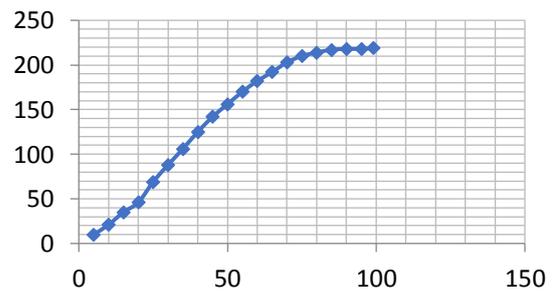
$$= 200 \times \sqrt{2}$$

$$= 141.42 \text{ V}$$

Tabel 3
Hasil keluaran PWM

Duty Cycle (%)	Tegangan Output (V)
99	219
95	218
90	218
85	217
80	214
75	210
70	203
65	192
60	182
55	170
50	156
45	142
40	125
35	106
30	88
25	69
20	46
15	35
10	21
5	10

Grafik pada gambar 10 merupakan hasil dari data tabel 3



Gambar 12. Grafik hubungan Tegangan Keluaran dan *Duty Cycle*

Pada pengujian, dimmer dapat menurunkan tegangan sesuai dengan nilai *duty cycle* yang diberikan. Dimmer memotong gelombang sinusoidal tetapi tidak merubah nilai frekuensi yang ada sehingga dimmer dapat digunakan pada sistem.

D. Pengujian keseluruhan

Pada pengujian keseluruhan dengan alat ukur multimeter apakah keluaran dari sistem sudah sesuai dengan *setpoint* yang telah ditentukan masukkan yang digunakan 220-250. Berdasarkan pengujian ini didapatkan hasil pada tabel 4.



Gambar 13. Hasil Pengukuran Keluara Sistem

Tabel 4
Hasil pengukuran *output* sistem

Tegangan <i>Input</i> (V)	Tegangan <i>Output</i> (V)
195	194
198	197
200	198
220	219
223	220
226	220
229	220
232	219
235	219
238	219
241	219
244	219
247	220
250	219

Berdasarkan data dari pengujian keseluruhan, sistem dapat berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Dengan mengubah nilai input sistem dapat menurunkan tegangan berada pada *setpoint* yang diinginkan. Pada proses menghilangkan nilai error terjadi osilasi pada mikrokontroler. Walaupun terjadi osilasi tidak mempengaruhi cahaya lampu. Proses dari pengujian keseluruhan pada lampiran 4. Gambar 13 merupakan tampilan dari alat yang sudah disusun rapid an diuji.



Gambar 14. Auto Voltage Regulator

V. KESIMPULAN

Dari percobaan dan pembahasan pada bab sebelumnya didapat beberapa kesimpulan antara lain:

- 1) Penggunaan sensor ZMPT101B baik digunakan untuk pengukuran tegangan dimana memiliki sensitifitas tinggi.
- 2) Hasil dari kalibrasi sensor sudah linier dengan hasil pembacaan alat ukur dengan *error* rata-rata 0.181%.
- 3) Perancangan dan program dari alat sudah sesuai dengan kebutuhan, berdasarkan hasil pengujian sistem dapat menurunkan tegangan.
- 4) Alat dapat bekerja dengan baik sesuai dengan yang diharapkan dimana ketika tegangan melebihi dari 220 VAC maka alat akan menurunkan tegangan secara otomatis.

REFERENSI

- [1] Nurdin, A. A. (2018). Peranan Automatic Voltage Regulator Sebagai Pengendali Tegangan Generator Sinkron. *Jurnal Ampere*, 164-173.
- [2] Kamal, A. M., & Subhan. (2017). Penerapan Automatic Voltage Regulator pada. *Seminar Nasional dan Expo Teknik Elektro* (pp. 1-7). Aceh: Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe.
- [3] Darmana, I. (2015). Perbaikan Jatuh Tegangan Dengan Pemasangan Automatic Voltage Regulator. *Jurnal IPTEKS Terapan*, 242-151.
- [4] Habibnur, Y., Warsito, A., & Setiawan, I. (2018). Perancangan Automatic Voltage Regulator (Avr) Berbasis Pengaturan Tegangan Catu Daya Arus Searah Inverter 1 Fase Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) Sinewave. *TRANSIENT*, 334-340.
- [5] Pamungkas, T. D., Haddin, M., & Rijanto3, E. (2017). Modifikasi Topologi Pengendali PID untuk Automatic. *JNTETI*, 380-385.
- [6] Ramadhani, A. (2014). Desain Model Sistem Eksitasi Type 1 Pada Generator Sinkron Menggunakan Kontrol Fuzzy Logic. *Jurnal intake*, 10-18.
- [7] Sandi, B. D., Hakim, L., & Gusmedi, H. (2016). Studi Pemasangan Step Voltage Regulator dengan Model Injeksi Daya pada Jaringan Menengah 20 KV Penyulang Katu Gardu Induk Menggala. *ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 129-139.

Alamat Redaksi
Jurusan Teknik Elektro Universitas Borneo Tarakan
Gedung D Lt. 3 Kampus Universitas Borneo Tarakan
Jl. Amal Lama No. 1 Tarakan 77123

