

Rancang Bangun Unit Kontrol Pompa Pada Sistem Pompa Listrik Tenaga Angin

Muchammad Ali, Rini Nur Hasanah, dan Hadi Suyono.

Abstrak – Implementasi *wind-electric pump system* (WEPS) BWC 1500-PD *stand alone* di wilayah provinsi Nusa Tenggara Timur sudah berjalan dengan baik. Implementasi WEPS tersebut sebagai pengisi bak air untuk mengairi kebun bibit tanaman buah dan sayuran, dan distribusi air bersih. Lokasi WEPS tersebar tidak merata karena ketersebaran potensi sumber tenaga anginnya. Namun implementasi WEPS tersebut tidak dapat bertahan lama karena konfigurasi mempunyai komponen *pump control unit* (PCU) yang lemah. Tujuan penelitian ini adalah menjalankan kembali fungsi WEPS BWC 1500-PD dengan merancang dan membuat PCU pengganti. Fungsi PCU adalah mengatur frekuensi suplai daya listrik pompa listrik sentrifugal (PLS) dalam rentang yang diinginkan. Disamping itu PCU juga berfungsi untuk merespons sinyal input dari sensor pengaman operasional WEPS. Kontrol V/f diterapkan pada WEPS untuk membuat PLS bekerja pada torsi konstan dan pada kecepatan yang diinginkan. Dari hasil pengujian, diketahui bahwa PCU pengganti berhasil membuat PLS bekerja dalam rentang frekuensi naik antara 40 Hz dan 90 Hz dan rentang frekuensi turun antara 70 Hz dan 30 Hz. PCU pengganti juga terbukti dapat merespons sinyal input dari sensor pengaman dengan cara memutuskan suplai daya listrik dari *permanent magnet generator* (PMG). Kontrol V/f diperoleh dengan menggabungkan rangkaian konverter frekuensi pada konfigurasi WEPS dan terbukti bahwa PLS dapat bekerja pada torsi yang konstan dan pada kecepatan yang diinginkan.

Kata Kunci— Kontrol pompa, Tenaga angin.

I. PENDAHULUAN

PENYEDIAAN air bersih termasuk masalah utama dalam pengembangan daerah tertinggal di Indonesia.

Air bersih yang dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan hidup sehat masyarakat seringkali tidak mudah diperoleh karena sumber air bersih ada di lokasi yang sulit dijangkau. Solusi yang dapat diaplikasikan terhadap masalah penyediaan air bersih adalah *wind-electric pump system* (WEPS) *stand alone* dengan kecepatan variabel. WEPS tersebut mempunyai daya nominal kecil (≤ 10 kW) dan biaya perawatan murah [1]. Konfigurasinya terdiri dari turbin angin poros horizontal, *permanent magnet generator* (PMG), *pump*

control unit (PCU), dan pompa listrik sentrifugal (PLS) standar (220 V~, 50 Hz, dan $p = 2$ atau 4 kutub magnet).

Kecepatan rotor turbin angin makin lambat bila diameter rotor turbin angin makin besar. Perbandingan jumlah kutub magnet yang besar antara PMG dan PLS digunakan sebagai *gearbox* listrik untuk melipatgandakan frekuensi suplai daya listrik dari PMG menjadi frekuensi nominal PLS yang diinginkan. Frekuensi variabel suplai daya listrik dari PMG digunakan untuk mengoperasikan PLS [2].

Implementasi WEPS BWC 1500-PD *stand alone* di wilayah provinsi Nusa Tenggara Timur sudah berjalan dengan baik, Implementasi WEPS tersebut sebagai pengisi bak air untuk mengairi kebun bibit tanaman buah, sayuran, dan distribusi air bersih. Lokasi WEPS tersebar tidak merata karena ketersebaran potensi sumber tenaga angin. Namun implementasi WEPS tersebut tidak dapat bertahan lama karena PCU adalah komponen yang menjalankan fungsi WEPS dan merupakan komponen WEPS yang lemah [3]. PCU tersebut menggunakan rangkaian komparator tegangan untuk kontrol *on-off* analog dengan membandingkan antara tegangan output PMG yang disearahkan dan tegangan searah referensi. Fungsi PCU adalah mengatur frekuensi suplai daya listrik PLS dalam rentang yang diinginkan dan merespons sinyal input dari sensor pengaman operasional WEPS. PCU pengganti dirancang dan dibuat untuk menjalankan kembali fungsi WEPS menggunakan mikrokontroler AVR untuk kontrol *on-off* digital dengan membandingkan antara frekuensi output PMG dan frekuensi referensi yang diinginkan. Rancangan PCU pengganti juga dapat menggabungkan konverter frekuensi untuk membuat PLS bekerja pada torsi konstan dan pada kecepatan yang diinginkan. Konfigurasi WEPS membutuhkan strategi kontrol yang tepat untuk meredam variasi kecepatan angin dengan mengatur kecepatan rotor turbin angin dan mengoptimalkan proses konversi tenaga angin karena turbin angin menyadap potensi tenaga angin variabel dan tidak pasti [2].

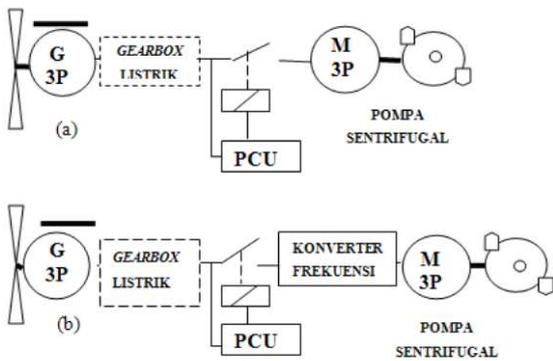
II. METODE RANCANG BANGUN

Metode yang digunakan adalah merancang dan membuat PCU pengganti untuk mengatur frekuensi suplai daya listrik PLS dalam rentang yang diinginkan, merespons sinyal input dari sensor pengaman operasional WEPS, dan menerapkan kontrol V/f pada suplai daya listrik PLS. Data awal yang diperlukan untuk merancang dan membuat PCU pengganti adalah tegangan dan frekuensi suplai daya listrik dari PMG pada kondisi mantap dan spesifikasi konstruksi dari

Muchammad Ali adalah mahasiswa Program Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya (e-mail: muchammad_ali1963@yahoo.com).

Rini Nur Hasanah, dan Hadi Suyono adalah staf pengajar Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang (e-mail: rini.hasanah@ub.ac.id; hadis@ub.ac.id).

semua komponen WEPS. PCU pada konfigurasi WEPS BWC 1500-PD masih menggunakan rangkaian komparator tegangan untuk kontrol on-off analog dengan membandingkan antara tegangan output PMG yang disearahkan dan tegangan searah referensi yang diinginkan. PCU merespons sinyal input dari sensor pengaman operasional WEPS menggunakan kontaktor rele. Rancangan PCU pengganti menggunakan mikrokontroler AVR untuk kontrol on-off digital dengan membandingkan antara frekuensi output PMG yang dihitung setiap detik dan frekuensi referensi yang diinginkan. Rancangan PCU pengganti untuk konfigurasi WEPS yang berbeda dibuat dengan hubungan langsung atau melalui konverter frekuensi antara PMG dan PLS untuk menerapkan kontrol V/f pada suplai daya listrik PLS seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.



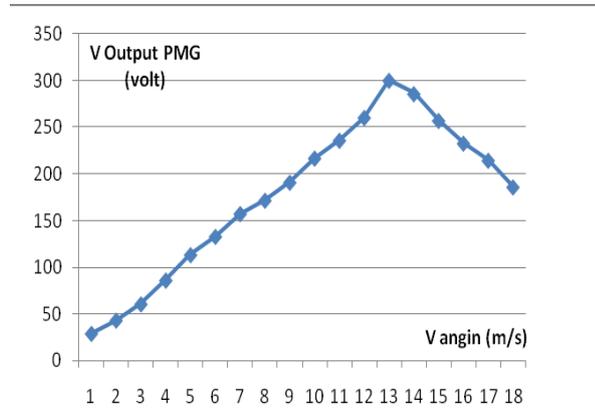
Gambar 1. Konfigurasi WEPS untuk (a) hubungan langsung dan (b) melalui konverter frekuensi.

III. RANCANGAN PCU DAN KONVERTER FREKUENSI

A. Parameter Input dan Output Pump Control Unit

Parameter input PCU adalah tegangan dan frekuensi output PMG. Parameter output PCU adalah tegangan dan frekuensi input PLS pada rentang frekuensi yang diinginkan. Rotor turbin angin BWC 1500-PD mempunyai perangkat kontrol kecepatan yang dapat meredam kecepatan angin tinggi dan kecepatan angin yang berubah dengan cepat. Daya output PMG berubah sebesar pangkat tiga kecepatan angin. Perangkat kontrol kecepatan rotor turbin angin ini menggunakan *pitch weight* yang ditempatkan pada posisi 1/4 panjang sudu angin dari ujung. Kecepatan angin yang tinggi diredam menggunakan *yaw tail assembly* atau *tilt tail assembly*. Perangkat kontrolnya menggunakan kopling pada putaran poros tinggi untuk mengekang dan melipat kepala rotor turbin angin menghadap ke samping pada sudut maksimal sebesar 70° terhadap arah angin datang. Poros turbin angin kembali lurus sejajar arah angin ketika kecepatan angin turun. Perangkat kontrol kecepatan menggunakan *pitch weight* dan *yaw tail assembly* atau *tilt tail assembly* menghasilkan karakteristik tegangan output dari PMG sebagai fungsi kecepatan angin seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 dapat dijelaskan bahwa hanya sebagian saja dari tegangan output PMG dalam rentang kecepatan angin yang dapat digunakan sebagai tegangan input PLS sehingga konfigurasi WEPS BWC 1500-PD dapat menggunakan PCU untuk mengoperasikan PLS pada rentang frekuensi yang diinginkan.



Gambar 2. Karakteristik tegangan output PMG sebagai fungsi dari kecepatan angin .

Tabel I adalah hasil perhitungan konversi dari rentang kecepatan angin menjadi rentang kecepatan rotor PMG, PLS dan frekuensi output PMG. Rentang frekuensi PMG dan PLS diperoleh dari perbandingan jumlah kutub magnet antara PMG dan PLS. Rotor turbin angin yang tersusun dari jumlah *blade*, $Z = 3$, profil *blade* NACA 4415 dengan sudut serang, $\alpha = 10^0$ menghasilkan TSR, λ optimal = 6,5 dan efisiensi daya, $C_p = 0,4528$. Diameter rotor BWC 1500-PD = 3,05 m pada kecepatan angin, $V_{rated} = 12,5$ m/s menghasilkan putaran rotor turbin, $n = \lambda \cdot V_{rated} / 2\pi R = 516$ rpm.

Jumlah kutub magnet rotor PMG = 20 unit dan jumlah kutub magnet ekivalen PLS = 4 unit, maka kecepatan rotor PLS dengan mengabaikan besarnya slip kecepatan = 2580 rpm dan frekuensi PLS = 103 Hz.

TABEL I
KONVERSI RENTANG KECEPATAN ANGIN MENJADI RENTANG KECEPATAN ROTOR PMG, PLS DAN FREKUENSI SUPLAI DARI PMG

Turbin Angin	$V_{cut\ in}$	V_{rated}	$V_{cut\ out}$
(m/s)	3,5	12,5	13,4
PMG	$n_r\ cut\ in$	n_r	$n_r\ cut\ out$
(rpm)	100	500	540
PLS	$n_r\ cut\ in$	n_r	$n_r\ cut\ out$
(rpm)	500	2500	2700
PMG-PLS	$f_{cut\ in}$	f	$f_{cut\ out}$
(Hz)	17	83	90

Rentang frekuensi output PMG berada antara 17 Hz dan 90 Hz. Aplikasi algoritma pada MC AVR PCU mengatur rentang frekuensi output PMG yang sama

dengan frekuensi yang diinginkan akan mengaktifkan rele kontaktor untuk membuka atau menutup kutub kontakannya. Kontaktor rele juga memutuskan suplai arus bolak-balik dari PMG ketika aliran air dalam pipa tersumbat, tekanan air turun drastis, atau level permukaan air atas dan bawah dalam tandon terlewati. Sumber arus searah untuk PCU diperoleh dari baterai yang disuplai oleh PMG melalui rangkaian penyearah.

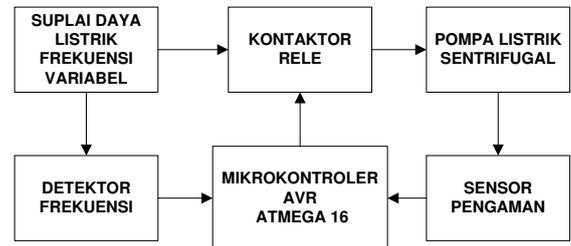
Kriteria rentang frekuensi naik dan turun yang diinginkan adalah:

1. PLS sebaiknya start sebelum mencapai frekuensi nominalnya untuk menghindari torsi beban maksimum pada rotor turbin angin. Awal rentang frekuensi naik, $f_{Low\ Cut-in} > 17\text{ Hz}$ untuk menjamin rotor turbin angin start dengan beban ringan. Akhir rentang frekuensi turun, $f_{Low\ Cut-out} < f_{Low\ Cut-in}$ karena masih ada gaya kelembaman pada $f_{Low\ Cut-in}$ dan selisih antara $f_{Low\ Cut-out}$ dan $f_{Low\ Cut-in}$ dibuat lebar untuk mengurangi *intermittent on-off* PLS pada kecepatan rendah. Berdasarkan pada pertimbangan teknis tersebut di atas, maka frekuensi, $f_{Low\ Cut-out}$ dan $f_{Low\ Cut-in}$ ditetapkan sebesar 30 Hz dan 40 Hz.
2. PLS dapat berputar sampai pada akhir rentang frekuensi naik, $f_{High\ Cut-out} > 90\text{ Hz}$. Awal rentang frekuensi turun, $f_{High\ Cut-in} > 50\text{ Hz}$ untuk menghindari torsi beban maksimum pada rotor turbin angin dan selisih antara $f_{High\ Cut-out}$ dan $f_{High\ Cut-in}$ dibuat lebar untuk mengurangi *intermittent on-off* PLS pada kecepatan tinggi. Berdasarkan pada pertimbangan teknis tersebut di atas, maka frekuensi, $f_{High\ Cut-out}$ dan $f_{High\ Cut-in}$ ditetapkan sebesar 90 Hz dan 70 Hz.

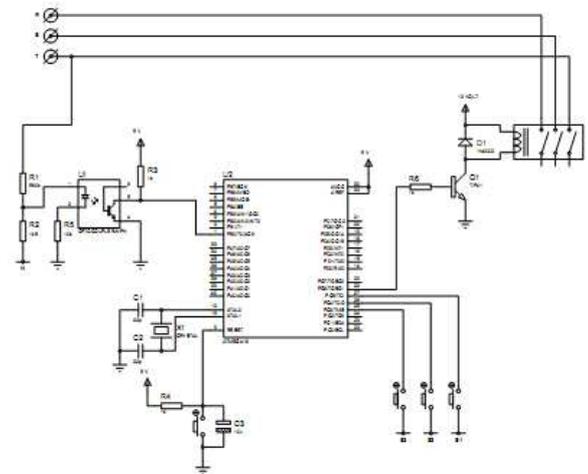
B. Rancangan Pump Control Unit

Prinsip kerja rancangan PCU digambarkan dengan diagram blok PCU pada Gambar 3. Optocoupler NPN-4N35 berfungsi sebagai detektor frekuensi pada suplai daya listrik dari PMG dan sebagai isolator antara rangkaian digital MC AVR dan rangkaian arus bolak-balik. Tegangan output dari PMG disesuaikan menggunakan rangkaian pembagi tegangan dan arus outputnya diubah menjadi denyut arus searah dengan frekuensi denyut sebesar frekuensi arus bolak-balik dari PMG. MC AVR menghitung frekuensi denyut setiap detik (melalui pin B.0), dan membandingkannya dengan nilai awal atau akhir dari rentang frekuensi naik atau turun yang diinginkan. Rentang frekuensi suplai daya listrik dari PMG yang diinginkan mengaktifkan kontaktor rele (melalui pin C.6). Penggunaan pin I/O MC AVR untuk rancangan PCU ditunjukkan pada Tabel II. Kontaktor rele aktif menutup kontakannya pada awal rentang frekuensi naik ($f > 40\text{ Hz}$) dan rentang frekuensi turun ($f < 70\text{ Hz}$). Kontaktor rele aktif membuka kontakannya pada akhir rentang frekuensi naik ($f > 90\text{ Hz}$) dan rentang frekuensi turun ($f < 30\text{ Hz}$). Sensor aliran, tekanan, dan apung yang mendeteksi aliran air tersumbat, tekanan air turun dan tandon air penuh atau habis akan mengaktifkan MC AVR (melalui pin C.3, C.4, dan C.5) dengan aktif *low*. Kontaktor rele

menghubungkan suplai daya listrik antara PMG dan PLS pada rentang frekuensi yang diinginkan. Rangkaian antara komponen PCU, suplai daya listrik dari PMG dengan frekuensi variabel, dan output arus bolak-balik ke PLS digambarkan dengan diagram rangkaian PCU pada Gambar 4.



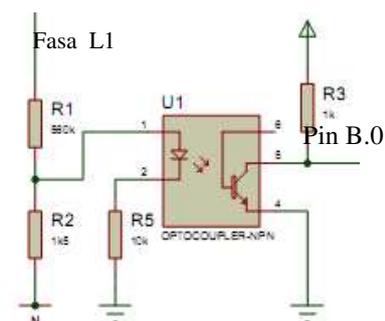
Gambar 3. Diagram blok PCU



Gambar 4 Diagram rangkaian PCU

TABLE II
PENGUNAAN PIN I/O MC AVR UNTUK PCU

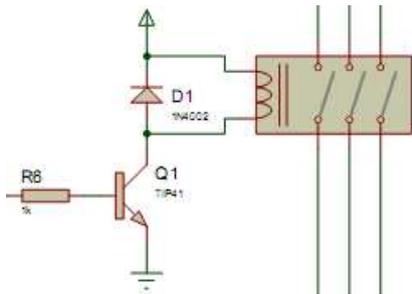
No.	Nama PIN	I/O	Nama I/O	Keterangan
1.	B.0	Input	4N35	Optocoupler
2.	C.6	Output	Driver	Kontaktor rele
3.	C.3	Input	Sensor	Aliran air
4.	C.4	Input	Sensor	Tekanan air
5.	C.5	Input	Sensor	Level air



Gambar 5. Optocoupler NPN-4N35

Parameter komponen optocoupler NPN-4N35 pada Gambar 5 adalah $I_{AK} maks. = 60 \text{ mA}$, $I_C maks. = 100 \text{ mA}$, dan $V_{CEO} = 30 \text{ V}$. Rancangan parameter komponen yang dibuat adalah $V_{L-N} = 300 \text{ V}$, $R_1 = 560 \text{ }\Omega$, $R_2 = 1\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $R_5 = 10\text{k}\Omega$, $V_{AK} = V_{L-N} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 7,826 \text{ V}$, $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $I_{AK} = \frac{V_{AK}}{R_5} = 0,78 \text{ mA}$, $I_C = \frac{V_{CC}}{R_3} = 5 \text{ mA}$.

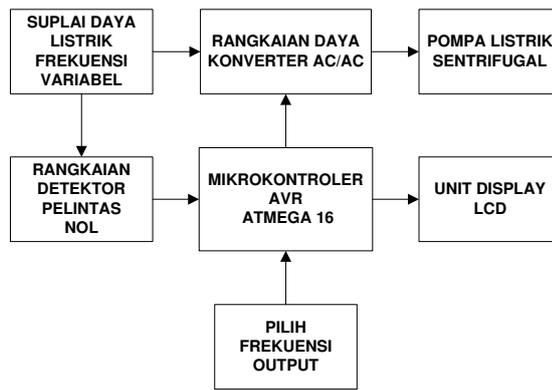
Parameter komponen *driver* input kontaktor rele pada Gambar 6 adalah $I_B maks. = 2 \text{ A}$, $I_C maks. = 6 \text{ A}$, dan $V_{CEO} maks. = 40 \text{ V}$. Rancangan parameter komponen yang dibuat adalah, $D1 = \text{IN4002}$, $R_6 = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{out} \text{ pin C.6} = 4,5\text{-}5,5 \text{ V}$, $I_B = 0,5 \text{ mA}$, dan $V_{CEO} = 12 \text{ V DC}$.



Gambar 6. Kontaktor rele dan *driver* input

C. Rancangan Konverter AC/AC

Prinsip kerja rancangan konverter AC/AC digambarkan dengan diagram blok konverter AC/AC pada Gambar 7. Rangkaian detektor pelintas nol adalah *optocoupler* NPN-4N35 yang berfungsi sebagai detektor titik nol pada suplai daya listrik dari PMG setelah PCU mengaktifkan kontaktor rele untuk menutup kontakannya. Peralihan yang terjadi pada saat arus fasa bolak-balik melintas titik nol menghasilkan gelombang kotak. Kemudian gelombang kotak disinkronkan menjadi pulsa picu pada rangkaian daya konverter AC/AC. Rangkaian tombol yang digunakan untuk memilih frekuensi output terdiri dari 4 buah tombol tekan NO (*normally open*) yang terhubung ke MC AVR melalui pin D0,D1,D2 dan D4. MC AVR menampilkan frekuensi yang dipilih pada tampilan LCD, dan memicu rangkaian daya konverter AC/AC (melalui pin C.0 s/d C.7) dengan pulsa picu sinkronisasi dari rangkaian detektor pelintas nol sebagai referensi (melalui pin D.3 dan D.5). Penggunaan pin I/O MC AVR untuk rancangan konverter AC/AC ditunjukkan pada Tabel III. LCD digunakan untuk menampilkan menu dan frekuensi output yang dipilih. *Optocoupler* NPN-4N35 menggunakan sinyal dari MC AVR dan input arus bolak-balik yang sesuai dengan konfigurasi penyalaaan SCR untuk memicu SCR pada rangkaian daya konverter AC/AC. *Optocoupler* juga berfungsi sebagai isolator antara rangkaian digital mikrokontroler AVR dan rangkaian daya konverter AC/AC. Rangkaian daya konverter AC/AC terdiri dari 2 penyearah terkontrol penuh dalam hubungan anti paralel.

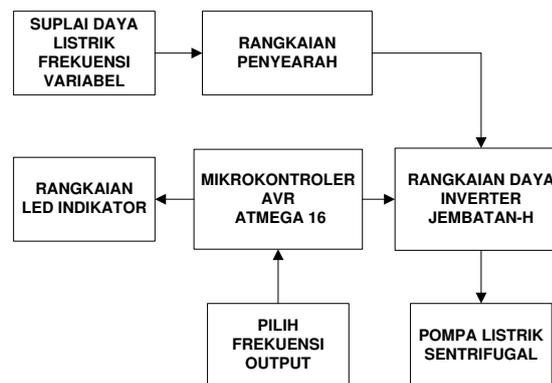


Gambar 7. Diagram blok konverter AC/AC

TABEL III
PENGUNAAN PIN I/O MC AVR UNTUK KONVERTER AC/AC

No	Pin	I/O	Keterangan
1.	Pin D.0	Input	Tombol S1 Up
2.	Pin D.1	Input	Tombol S2 Down
3.	Pin D.2	Input	Tombol S3 OK/Start
4.	Pin D.4	Input	Tombol S4 Stop
5.	Pin D.3 dan D.5	Input	Optocoupler ZCD
6.	Pin A.0	Output	Pin RS LCD
7.	Pin A.1	Output	Pin RW LCD
8.	Pin A.2	Output	Pin E LCD
9.	Pin A.4 dan A.5	Output	Pin D.4 dan D.5 LCD
10.	Pin A.6 dan A.7	Output	Pin D.6 dan D.7 LCD
11.	Pin C.0 dan C.1	Output	Gate SCR T2' dan T1'
12.	Pin C.2 dan C.3	Output	Gate SCR T4 dan T3
13.	Pin C.4 dan C.5	Output	Gate SCR T4' dan T2
14.	Pin C.6 dan C.7	Output	Gate SCR T3' dan T1

D. Rancangan Konverter AC-DC/DC-AC



Gambar 8. Diagram blok konverter AC-DC/DC-AC

Prinsip kerja rancangan konverter AC-DC/DC-AC digambarkan menggunakan diagram blok pada Gambar 8. Rangkaian penyearah digunakan untuk menyearahkan suplai daya listrik dari PMG setelah PCU mengaktifkan kontaktor rele untuk menutup kontakannya dan mencatu tegangan searah pada rangkaian daya inverter jembatan-H. Rangkaian daya inverter jembatan-H berfungsi sebagai rangkaian *switching* tegangan sekunder trafo yang disearahkan. Proses *switching* menggunakan MOSFET yang bekerja pada frekuensi tinggi. Rangkaian Led indikator digunakan untuk mengetahui

kecepatan motor PLS dan MC AVR digunakan untuk membangkitkan pulsa sinusoidal SPWM. Penggunaan pin I/O MC AVR untuk rancangan konverter AC-DC/DC-AC ditunjukkan pada Tabel IV

TABLE IV
PENGGUNAAN PIN I/O MC AVR UNTUK KONVERTER
AC-DC/DC-AC

No	Pin	I/O	Keterangan
1.	B.1	Output	Output pulsa sinus
2.	B.2	Output	Output pulsa sinus interupsi
3.	C.0	Input	frekuensi pulsa sinus
4.	D.0-D.7	Output	Lampu indikator

IV. ANALISIS RANCANGAN PCU DAN KONFIGURASI WEPS

A. Analisis Hasil Pengujian PLS

Data primer hasil pengujian sebagai parameter input adalah tegangan dan frekuensi suplai daya listrik dari PMG pada kondisi mantap dan spesifikasi konstruksi dari komponen WEPS. Data sekunder adalah hasil perhitungan dan analisis untuk menyatakan torsi output dan efisiensi daya PLS menggunakan persamaan torsi output dan efisiensi daya PLS pada kondisi mantap seperti berikut :

1. Parameter konstruksi PMG adalah generator sinkron magnet permanen 1,3, dan 6 fasa, 12 kawat, $P_{nom} = 1500$ W, $p = 20$ kutub, tegangan rangkaian terbuka, $V_{OC} = 500$ V~, tegangan kerja maks. = 300 V~, dan frekuensi variabel.
2. Parameter konstruksi PLS adalah motor induksi rotor sangkar 3 fasa, $P_{nominal} = 2$ HP, $n_r = 1415$ rpm, $V_Y = 380$ V, $V_{\Delta} = 220$ V, $I_Y = 3,8$ A, $I_{\Delta} = 6,6$ A, $\cos \varphi = 0,79$, η daya = 0,73, $f = 50$ Hz, dan $p = 4$ kutub.
3. Parameter rangkaian ekuivalen PLS adalah ;
Resistansi belitan stator per fasa, $R_s = 8,65611 \Omega$
Resistansi belitan rotor per fasa, $R_r = 3,28687 \Omega$
Reaktansi belitan stator dan rotor per fasa, $X_s = X_r = X_{LR}/2 = 7,32 \Omega$
Induktansi belitan stator dan rotor, $L_s = L_r = X_s/2\pi f = X_r/2\pi f = 0,0233$ H
Reaktansi magnet per fasa, $X_m = 51,2 \Omega$
Induktansi magnet per fasa, $L_m = X_m / 2\pi f = 51,195/2\pi 50 = 0,162959$ H
Arus magnetisasi, $I_m = \lambda_m / L_m$, $\lambda_m \approx V_s/f$
Resistansi magnet, $R_{FE} = 61,376 \Omega$
Reaktansi ekuivalen belitan stator, $X_{es} = X_s = 7,32 \Omega$
Resistansi ekuivalen belitan stator, $R_{es} = X_s \times R_s / X_s + X_m = 7,32023 \Omega$

4. Torsi output PLS pada kondisi mantap,

$$T = \frac{1}{\omega_s} \cdot \frac{3 \cdot V^2 \left(\frac{R_r}{s} \right)}{(R_{es} + \frac{R_r}{s})^2 + (X_{es} + X_r)^2} \quad (\text{Nm}) \quad (1)$$

5. Daya output PLS,

$$P_{out} = T \cdot \omega_r \quad (\text{watt}) \quad (2)$$

$$6. \text{ Arus rotor, } I_r = \sqrt{\frac{P_{out}}{\left(\frac{R_r}{s} \right) (1-s)}} \quad (\text{A}), \text{ dan arus stator,}$$

$$I_s = \sqrt{I_r^2 + I_m^2} \quad (\text{A}) \quad (4.3) \quad (3)$$

7. Disipasi daya stator, $P_s = 3 \cdot I_s^2 \cdot R_s$ (watt), dan daya rotor,

$$P_r = 3 \cdot I_r^2 \cdot R_r \quad (\text{watt}) \quad (4)$$

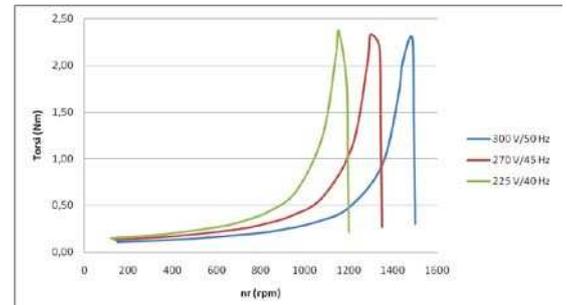
8. Daya rugi, $P_{rugi} = P_s + P_r$ (watt), dan daya input,

$$P_{in} = P_{out} + P_{rugi} \quad (\text{watt}) \quad (5)$$

9. Efisiensi daya PLS,

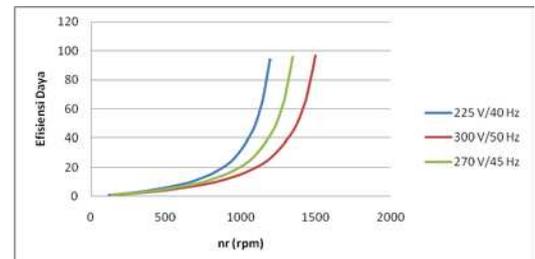
$$\eta_{daya} = P_{out}/P_{in} \quad (6)$$

Data sekunder hasil perhitungan yang digambarkan pada Gambar 9 dan 10 di bawah ini diperoleh dari data primer hasil pengujian terhadap PLS dengan rasio V/f suplai dibuat bervariasi untuk memperoleh torsi output PLS relatif konstan dan efisiensi dayanya. Rasio V/f yang digunakan sebesar 300 V/ 50 Hz, 270 V/45 Hz, dan 225 V/40 Hz.



Gambar 9. Torsi output PLS dengan rasio V/f suplai (300/50, 270/45, 225/40) V/Hz

Gambar 9 memberikan penjelasan bahwa kombinasi kontrol V/f yang bervariasi pada rentang frekuensi PLS yang diinginkan dapat membuat PLS bekerja pada torsi output konstan.



Gambar 10. Efisiensi daya PLS dengan rasio V/f suplai (300/50, 270/45, 225/40) V/Hz

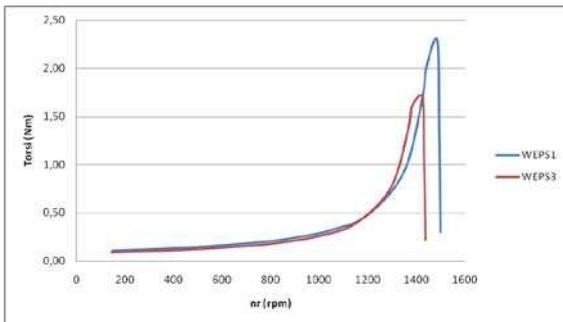
Gambar 10 memberikan penjelasan bahwa efisiensi daya PLS relatif sama untuk kombinasi kontrol V/f yang bervariasi pada frekuensi, f yang sama.

B. Analisis Konfigurasi WEPS

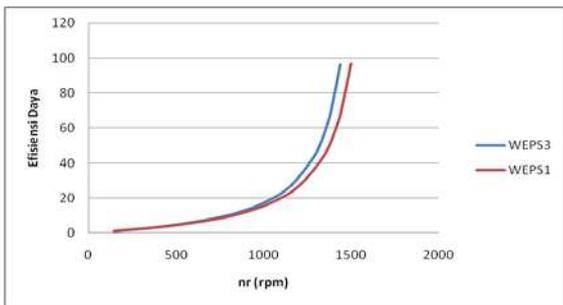
Analisis konfigurasi WEPS berkaitan dengan data sekunder hasil perhitungan yang digambarkan pada Gambar 11 dan 12 diperoleh dari data primer hasil

pengujian terhadap PLS pada konfigurasi WEPS yang berbeda seperti berikut :

Konfigurasi WEPS1 menghubungkan konverter AC-DC/DC-AC antara PMG dan PLS dan tidak menggunakan frekuensi variabel pada rentang frekuensi nominal PLS. Konfigurasi WEPS2 menghubungkan konverter AC/AC antara PMG dan PLS dan tidak menggunakan frekuensi variabel pada rentang frekuensi nominal PLS. Konfigurasi WEPS3 menghubungkan langsung antara PMG dan PLS tanpa konverter frekuensi dan menggunakan frekuensi variabel pada rentang frekuensi nominal PLS.



Gambar 11. Konfigurasi WEPS1 mempunyai daya output lebih besar daripada konfigurasi WEPS3



Gambar 12. Konfigurasi WEPS1 dan WEPS3 mempunyai efisiensi daya sama

Gambar 11 dan 12 di atas memberikan penjelasan bahwa konfigurasi WEPS1 menggunakan kontrol V/f dengan tegangan, V lebih besar pada frekuensi, f yang sama dalam rentang frekuensi nominal PLS menghasilkan torsi output PLS lebih besar daripada konfigurasi WEPS3. Efisiensi daya PLS konfigurasi WEPS1 dan WEPS3 sama pada frekuensi suplai yang sama. Torsi PLS maksimal pada konfigurasi WEPS1 dan WEPS3 dicapai pada kecepatan rotor yang sama bila frekuensi suplai daya listrik PLS sama. Torsi PLS maksimal pada konfigurasi WEPS1 dan WEPS3 dicapai pada frekuensi/kecepatan rotor yang dibuat sedikit berbeda. Suplai daya listrik PLS dari konfigurasi WEPS2 dalam rentang frekuensi nominal PLS tidak dapat mencapai tegangan dan frekuensi nominal PLS. Konverter AC/AC menghasilkan penurunan kelipatan frekuensi output sebesar $\frac{1}{2} \cdot f_{input}$, $\frac{1}{3} \cdot f_{input}$, dan $\frac{1}{4} \cdot f_{input}$ dan tegangan input masih lebih besar daripada tegangan output sehingga konfigurasi WEPS2 tidak dapat digunakan untuk mengatur frekuensi suplai daya listrik PLS.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

- Rancang bangun *pump control unit* (PCU) pengganti untuk *wind-electric pump system* (WEPS) yang dihasilkan dari penelitian ini berhasil membuat WEPS BWC 1500-PD berfungsi kembali dengan karakteristik kerja sebagai berikut :
 - PCU berfungsi untuk mengatur kerja pompa listrik sentrifugal (PLS) yang digunakan pada rentang frekuensi yang diinginkan, yaitu pada rentang frekuensi naik antara 40 dan 90 Hz dan pada rentang frekuensi turun antara 70 dan 30 Hz.
 - Pada kondisi yang tidak diinginkan, sensor pengaman operasional WEPS memberikan sinyal ke PCU untuk memutuskan suplai daya listrik dari *permanent magnet generator* (PMG).
- Dari ketiga konfigurasi WEPS yang digunakan dengan menggabungkan konverter AC-DC/DC-AC (konfigurasi WEPS1) atau konverter AC/AC (konfigurasi WEPS2) dan tanpa konverter frekuensi (konfigurasi WEPS3) dapat disimpulkan bahwa konfigurasi yang paling tepat adalah WEPS1 karena PLS menghasilkan torsi lebih konstan dibandingkan dengan WEPS3. Konfigurasi WEPS2 tidak dapat digunakan untuk mengatur frekuensi suplai daya listrik PLS karena tegangan dan frekuensi output dari konverter AC/AC tidak dapat mencapai nilai nominal PLS. Konverter AC/AC menghasilkan penurunan tegangan output dan kelipatan frekuensi output sebesar $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, dan $\frac{1}{4}$ frekuensi input.

B. Saran

Penelitian lanjutan diperlukan untuk mengetahui volume debit air output dari PLS yang disuplai daya listrik dengan frekuensi variabel atau dengan kontrol V/f konstan. Desain PCU dibuat untuk konfigurasi WEPS yang berbeda dimana PCU terhubung pada rangkaian parallel PMG dan PLS atau menyediakan jalur suplai daya listrik langsung antara sumber *back up* dan PLS untukantisipasi pada masa perbaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chen, Y., Pillay, P., Khan, A. 2005. *Permanent Magnet Wind Generator Topologies*, IEEE Transactions on Industry Applications. **41(6)**: 16-26.
- [2] Camocardi, P.A., Battaiotto, P.E., Mantz, R.J. 2010. *BDFIG-Based Wind Electric Pumping System With a Variable Structure Control Strategy*, International Journal of System Control. **Vol. 1-2010/Iss.2**: pp. 38-47.
- [3] Bergey, M.L.S. 1998. *Wind-Electric Pumping Systems for Communities*, First International Symposium on Safe Drinking Water in Small Systems. Washington DC.