

# Perancangan Sistem Pengendalian Kecepatan Motor Pompa Air Tekanan Konstan

Hari Widagdo Putra<sup>1</sup>, Ir. Wijono, M.T., Ph.D<sup>2</sup>, Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, <sup>2,3</sup>Dosen Jurusan Teknik Elektro, Universitas Brawijaya  
Jalan MT Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: hariwidagdo1@gmail.com

**Abstrak**— Penelitian ini membahas tentang pengendalian motor penggerak pompa air yang dimaksudkan untuk menghasilkan tekanan keluaran pompa yang konstan. Tekanan konstan diperlukan oleh suatu sistem pompa air untuk mengatasi perbedaan debit pada sistem instalasi air ketika jumlah keran yang dibuka bervariasi. Pada saat satu keran dibuka, tekanan air akan sangat tinggi, tetapi saat beberapa keran dibuka tekanan air akan menurun. Hal ini menjadi permasalahan pada sistem yang kerjanya dipengaruhi oleh tekanan seperti pemanas air. Pengendalian kecepatan pompa dilakukan oleh rangkaian PWM ac chopper yang dapat mengubah tegangan masukan sumber yang dicatukan ke motor berdasarkan *duty-cycle* PWM dengan umpan balik sensor tekanan. Hasilnya adalah tekanan keluaran pompa dapat dipertahankan konstan sesuai dengan *set-point* sebesar  $0,8 \text{ kg/cm}^2$ . Namun demikian, debit air yang dihasilkan di setiap keran tidak konstan. Oleh sebab itu, konsep pengendalian perlu diperbaiki agar dapat menghasilkan debit yang konstan.

**Kata kunci**— Tekanan konstan, Motor pompa, pwm ac chopper

## I. PENDAHULUAN

Pompa air adalah salah satu produk teknologi pendukung ketersediaan air. Kemampuannya untuk memindahkan air dari satu tempat ke tempat lain membuatnya sering digunakan di mana-mana. Pompa menghasilkan tekanan yang dibutuhkan cairan untuk mengatasi gravitasi, gesekan maupun tekanan sistem sehingga air dapat dialirkan bahkan dari tempat bertekanan rendah ke tempat bertekanan tinggi.

Tekanan air menjadi salah satu parameter penting yang selalu menjadi perhatian penggunaannya. Ada beberapa sistem yang kerjanya dipengaruhi oleh tekanan air seperti pemanas air rumah tangga. Jika tekanan air yang masuk ke pemanas air berubah-ubah, maka suhu air menjadi tidak stabil. Tekanan air harus dipertahankan konstan agar hal tersebut tidak terjadi.

Perubahan resistansi sistem akibat sejumlah keran yang dibuka tidak bersamaan akan mempengaruhi tekanan air di sisi keluaran pompa (*discharge*). Semakin banyak keran yang dibuka menyebabkan semakin kecil tekanan air. Namun, semakin sedikit keran yang dibuka, tekanan air akan meningkat.

Untuk itu diperlukan suatu alat yang dapat mempertahankan tekanan agar tetap konstan berapa pun jumlah keran yang dibuka. Salah satu caranya adalah dengan menggunakan VSD (*variable speed drive*) untuk mengatur kecepatan motor pompa sesuai dengan tekanan yang dibutuhkan. VSD akan menambah kecepatan motor pompa ketika tekanan air berku-

rang dan mengurangi kecepatan motor pompa ketika tekanan air bertambah. Kecepatan motor dapat disesuaikan dengan mengubah tegangan masukan motor. Dalam skripsi ini rangkaian VSD yang digunakan berupa pwm ac chopper. Kelebihan pwm ac chopper ini adalah arusnya yang kontinu dibandingan pengaturan sudut fasa, tetapi rangkaiannya lebih sederhana daripada inverter dc-ac. Alat yang dirancang berupa modul *add-on*, yakni modul yang dapat langsung dipasang tanpa harus membongkar motor atau pompa.

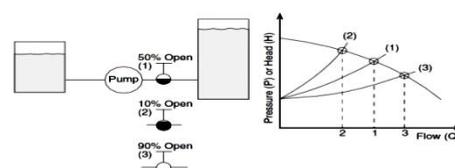
## II. RANCANGAN PENELITIAN

Pada penelitian ini, kecepatan pompa akan diatur agar tekanan output pompa sesuai dengan tekanan *set-point*. Pengaturan kecepatan dilakukan dengan jalan mengubah tegangan masukan motor pompa. Perubahan tegangan masukan motor turut mempengaruhi torsi yang dihasilkan sehingga slip motor induksi akan berubah seiring dengan perubahan torsi. Untuk itu dirancang suatu *converter* yang mengubah sumber tegangan tetap menjadi tegangan variabel. Converter tersebut berupa PWM AC Chopper yang akan mencah gelombang tegangan sumber. Rangkaian ini dilengkapi dengan snubber agar komponen *switching* terlindungi dari tegangan paku yang dihasilkan oleh beban induktif.

### A. Pengaturan Tekanan Pompa

Tekanan pompa dapat diatur dengan menggeser titik kerja pompa. Pergeseran titik kerja tersebut dapat terjadi di sepanjang kurva karakteristik pompa maupun kurva karakteristik sistem bergantung pada metode yang dilakukan. Ada beberapa cara pengaturan tekanan output pompa, tetapi yang akan dibahas terkait dengan penelitian ini adalah *throttling* dan pengaturan kecepatan pompa.

Metode *throttling* adalah mengatur seberapa besar bukaan keran. Pada gambar 1 terlihat bahwa Besar kecilnya bukaan keran akan mempengaruhi kemiringan kurva sistem. Hal ini juga berlaku pada sistem yang melibatkan banyak keran meski setiap bukaan setiap keran seragam. Jumlah keran yang dibuka mempengaruhi besarnya resistansi sistem sehingga kemiringan kurva sistem ikut berubah.

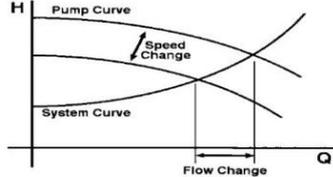


Gambar 1. Pengaruh bukaan keran terhadap tekanan dan debit

Hubungan antara head dengan debit pada kurva sistem ditunjukkan oleh persamaan 1.

$$H = k \cdot Q^2 \quad (1)$$

Agar tekanan dapat dipertahankan konstan berapapun keran yang dibuka, dilakukan pengaturan kecepatan pompa dengan menggunakan VSD. Pada gambar 2 terlihat bahwa perubahan kecepatan pompa menyebabkan kurva pompa bergeser ke atas atau ke bawah sehingga titik kerja pompa bergeser di sepanjang kurva sistem



Gambar 1. Kurva pompa dan kurva sistem

Hubungan antara head dengan tekanan ditunjukkan oleh persamaan 2.

$$H = \frac{P \times 2.31}{SG} \quad (2)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 1 ke persamaan 2, didapatkan hubungan antara tekanan dan debit.

$$P = \frac{k_1}{2.31 \times SG} \times Q^2 \quad (3)$$

Menurut hukum afinitas, kecepatan pompa sebanding dengan debit yang dihasilkan sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut.

$$N = k_2 \times Q \quad (4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 3 ke persamaan 4, didapatkan hubungan antara tekanan dan kecepatan putaran pompa.

$$P = \frac{k_1}{2.31 \times SG \times k_2^2} \times N^2 \quad (5)$$

$$P = k_T \times N^2 \quad (6)$$

### B. Torsi Motor Induksi Satu Fasa

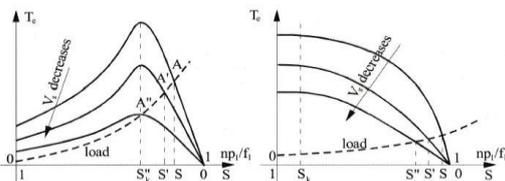
Hubungan antara kecepatan dan slip ditunjukkan oleh persamaan 9.

$$n = \frac{f_1}{p_1} (1 - s) \quad (9)$$

Rumus tersebut menunjukkan bahwa kecepatan dapat diubah melalui:

- Slip (S) : mengubah tegangan masukan.
- Jumlah kutub ( $2p_1$ ) : mengubah belitan stator.
- Frekuensi : frekuensi converter.

Dalam penelitian ini, pengaturan kecepatan motor induksi dilakukan dengan mengatur tegangan masukan sementara frekuensi sumber dibiarkan konstan. Saat tegangan stator dikurangi oleh *autotransformer* atau *ac voltage controller*, slip kritis ( $S_k$ ) tetap konstan, tapi torsi berubah terhadap kuadrat tegangan stator seperti yang terlihat pada gambar 3.



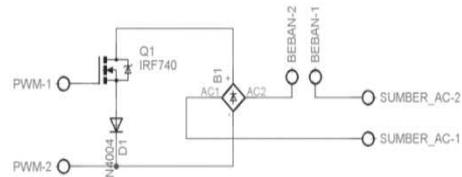
Gambar 3. Kurva torsi terhadap kecepatan untuk tingkat tegangan yang berbeda

Rumus torsi motor induksi satu fasa jenis *capacitor-run* ditunjukkan oleh persamaan 10.

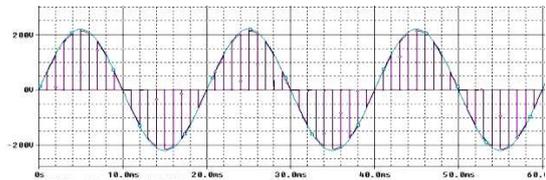
$$T = \frac{((I_m)^2 + |I_a|^2)(R_f - R_b) + 2a|I_m||I_a|(R_f + R_b)\sin(\theta_a - \theta_m)}{n_s} \quad (10)$$

### C. Pengaturan dengan PWM AC Chopper

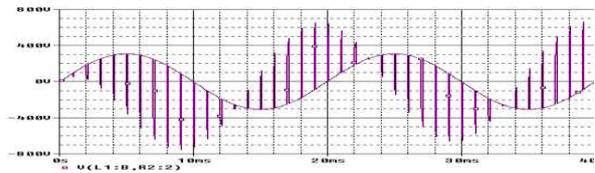
PWM ac chopper adalah konsep pengaturan tegangan ac yang terinspirasi dari dc-dc converter. Dengan menggunakan komponen switching yang sama, pwm ac chopper mencacah gelombang sinus untuk mengubah nilai tegangan dan arus beban. Mosfet dioperasikan sebagai saklar yang akan dipicu dengan sinyal pwm pada frekuensi tertentu. Rangkaian pwm ac chopper dan bentuk gelombang tegangan bebannya dapat dilihat pada gambar 4, 5 dan 6.



Gambar 4. Rangkaian PWM AC Chopper



Gambar 5. Bentuk gelombang tegangan beban resistif



Gambar 6. Bentuk gelombang tegangan beban resistif-induktif

Sejatinya rangkaian PWM ac chopper terdiri atas dua transistor daya dimana satu terpasang seri dan satu lagi paralel terhadap beban. Transistor yang terhubung seri berfungsi mengatur daya beban sedangkan transistor paralel menyediakan jalur (*freewheeling*) untuk mengalirkan arus motor ketika transistor seri padam. Jika jalur ini tidak ada maka energi induktif akan menginduksikan tegangan yang sangat tinggi dan energi ini didisipasi dalam bentuk panas (percikan bunga api) pada komponen *switching* [3].

Sebagai tahap awal penelitian rangkaian PWM AC Chopper hanya menggunakan satu buah MOSFET. Untuk menekan tegangan paku dari beban induktif, MOSFET dilindungi oleh rangkaian snubber yang berfungsi meredam ggl balik dari beban ketika mosfet padam.

### D. Aplikasi Rangkaian Snubber

Rangkaian snubber diperlukan untuk mengurangi rugi daya dalam transistor selama penyaklaran dan melindungi komponen dari stress tegangan dan arus (Hart, 2011). Rangkaian snubber dirancang untuk memodifikasi bentuk gelombang peralihan sehingga kerugian daya dapat dikurangi. Prinsip kerjanya adalah dengan memindahkan energi yang seharusnya

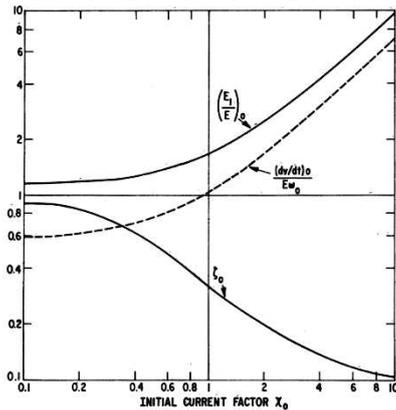
diserap oleh komponen *switching* ke rangkaian snubber.

Ada dua parameter yang perlu diperhatikan dalam perancangan snubber, yakni rasio peredaman dan faktor arus. Nilai rasio peredaman ( $\delta$ ) dan faktor arus ( $\chi$ ) dapat dicari dengan persamaan 11 dan 12.

$$\delta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (11)$$

$$\chi = \frac{I}{V_s} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (12)$$

McMurray [2] mendesain kurva perancangan optimum seperti yang terlihat pada gambar 7.



Gambar 7. Parameter snubber optimum

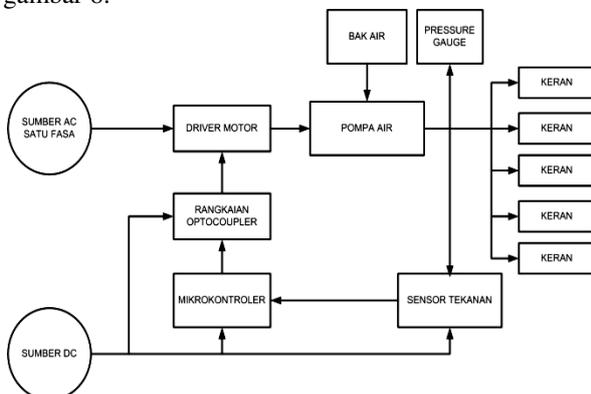
Langkah-langkah penentuan nilai resistor dan kapasitor snubber adalah sebagai berikut:

1. Tentukan arus beban  $I$ , induktansi beban  $L$  dan tegangan sumber  $E$ .
2. Menentukan tegangan puncak transien yang diizinkan ( $E_1$ ). Lalu, hitung perbandingan tegangan puncak transien dengan tegangan sumber ( $E_1/E$ ).
3. Dari gambar 7, cari nilai  $\chi_0$  dan  $\delta_0$  untuk nilai ( $E_1/E$ ) yang telah ditetapkan sebelumnya.
4. Hitung nilai resistor dan kapasitor snubber dengan persamaan 11 dan 12.

### III. PERANCANGAN ALAT

#### A. Blok Diagram Sistem

Blok diagram sistem pengendalian kecepatan motor pompa air tekanan konstan ditunjukkan oleh gambar 8.



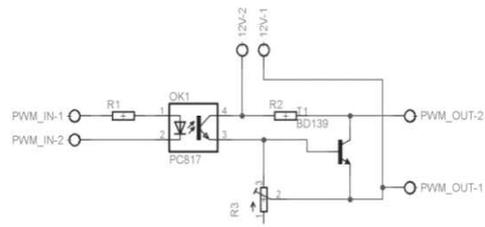
Gambar 8. diagram sistem pengendalian kecepatan motor pompa air tekanan konstan

Sistem pengendalian kecepatan motor pompa air tekanan konstan terdiri atas rangkaian MOSFET

sebagai pwm ac chopper, rangkaian *optocoupler* sebagai driver MOSFET dan pemisah antara rangkaian MOSFET dengan mikrokontroler, serta mikrokontroler sebagai pemroses algoritma pengendalian kecepatan motor dengan umpan balik dari sensor tekanan. Sebelum sistem dijalankan, nilai *set-point* dimasukkan ke dalam program arduino. Jika tekanan air lebih dari *set-point*, mikrokontroler akan mengurangi *duty-cycle* PWM sehingga kecepatan motor berkurang. Sebaliknya, *duty-cycle* PWM akan ditambah jika tekanan air kurang dari *set-point*.

#### B. Perancangan Rangkaian Optocoupler

*Optocoupler* yang akan digunakan adalah PC817. Opto ini digunakan karena memiliki nilai *time rise* dan *time fall* yang kecil, yakni  $4 \mu s$  dan  $3 \mu s$  sehingga IC dapat meneruskan sinyal berfrekuensi tinggi. Tegangan isolasinya mencapai  $5000 V_{rms}$  Rangkaian minimum optocoupler dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Rangkaian minimum optocoupler

#### C. Perancangan Rangkaian Snubber

Dengan RLC meter, nilai induktansi motor induksi satu fasa didapatkan sebesar  $0,06H$ . Tegangan rms sumber adalah  $220V$  dan arus rms beban adalah  $1,8A$ . Karena bentuk gelombang tegangan dan arus mosfet hasil penyearahan dioda jembatan tidak rata maka diambil nilai puncak dari tegangan dan arus untuk menghitung nilai komponen snubber.

$$I_m = I_{rms} \times \sqrt{2}$$

$$I_m = 1,8 \times \sqrt{2}$$

$$I_m = 2,55 A$$

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

$$V_m = 220 \times \sqrt{2}$$

$$V_m = 311 V$$

Jika tegangan balik yang diizinkan adalah 1,5 kali tegangan sumber maka besar nilai  $\chi_0$  dan  $\delta_0$  menurut grafik parameter snubber optimum adalah  $0,75$  dan  $0,4$ . Nilai kapasitor dan resistor snubber dicari dengan persamaan 10 dan 11.

$$\chi = \frac{I}{V_s} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$C = L \left( \frac{I}{\chi V_s} \right)^2$$

$$C = 0,06 \left( \frac{2,55}{0,75 \cdot 311} \right)^2$$

$$C = 6,89 \times 10^{-6} F$$

$$\delta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$R = 2\delta \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$R = 2 \times 0,4 \sqrt{\frac{0,06}{6,89 \times 10^{-6}}}$$

$$R = 74,64 \Omega$$

Sesuai dengan komponen yang ada di pasaran, nilai resistor dan kapasitor snubber yang dipakai adalah  $4,7 \mu F$  dan  $60 \Omega$ .

Dengan cara yang sama, perancangan snubber untuk beban motor pompa dimulai dengan tegangan sumber, arus beban dan induktansi motor pompa. Dengan RLC meter, nilai induktansi motor pompa didapatkan sebesar  $0,03 H$ . Tegangan nominal motor adalah  $220 V$  dan arus nominal adalah  $0,98 A$ .

$$I_m = I_{rms} \times \sqrt{2}$$

$$I_m = 0,98 \times \sqrt{2}$$

$$I_m = 1,4 A$$

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

$$V_m = 220 \times \sqrt{2}$$

$$V_m = 311 V$$

Dengan langkah yang sama, nilai kapasitor dan resistor snubber dicari melalui persamaan 11 dan 12.

$$C = L \left( \frac{I}{\lambda V_s} \right)^2$$

$$C = 0,03 \left( \frac{1,4}{0,75 \cdot 311} \right)^2$$

$$C = 1,08 \times 10^{-6} F$$

$$R = 2\delta \sqrt{\frac{L}{C}}$$

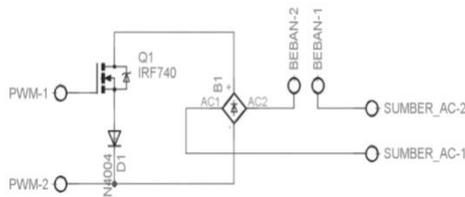
$$R = 2 \times 0,4 \sqrt{\frac{0,03}{1,08 \times 10^{-6}}}$$

$$R = 133,28 \Omega$$

Sesuai dengan komponen yang ada di pasaran, nilai resistor dan kapasitor snubber yang dipakai adalah  $1,36 \mu F$  dan  $132 \Omega$ .

#### D. Perancangan Rangkaian Daya

Mosfet hanya dapat bekerja pada tegangan dan arus searah sehingga memerlukan diode penyearah untuk menyearahkan tegangan dan arus yang masuk ke mosfet. Kombinasi diode penyearah dan mosfet disebut juga *bilateral switch* atau saklar dua arah. MOSFET yang akan digunakan adalah IRF740 dengan spesifikasi  $V_{DS}$  sebesar  $400 V$  dan arus drain sebesar  $10 A$ .



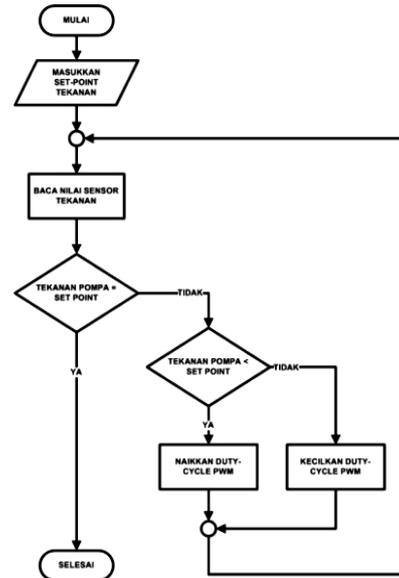
Gambar 10. Rangkaian minimum optocoupler

#### E. Perancangan Program Arduino Uno

Hal pertama yang harus dilakukan adalah memasukkan *set-point* pada program Arduino Uno sebelum sistem dijalankan. *Set-point* tersebut berupa bit yang terbaca mikrokontroler dari sensor tekanan saat

*pressure gauge* menunjukkan tekanan yang diinginkan.

Diagram alir program Arduino Uno dapat dilihat pada gambar 11.



Gambar 11. Diagram alir program Arduino Uno

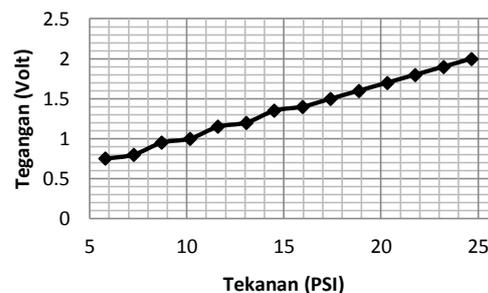
### IV. PENGUJIAN DAN ANALISIS DATA

#### A. Pengujian Sensor Tekanan

Pengujian ini bertujuan melihat besarnya tegangan yang dihasilkan sensor saat merasakan tekanan. Tegangan yang dihasilkan sensor akan disetarakan dengan tekanan yang tertera pada *pressure gauge*. Hasil pengujian sensor tekanan dapat dilihat pada tabel 1. Dan gambar 11.

Tabel 1. Hasil pengujian sensor tekanan

Pengujian ke-	Tekanan Air (psi)	Tegangan (Volt)	Bit Mikrokontroler
1	6	0.75	168
2	7	0.8	182
3	9	0.95	214
4	10	1	225
5	12	1.15	254
6	13	1.2	268
7	15	1.35	294
8	16	1.4	310
9	17	1.5	325
10	19	1.6	353
11	20	1.7	369
12	22	1.8	399
13	23	1.9	410
14	25	2	437



Gambar 12. Grafik tekanan air terhadap tegangan yang dihasilkan sensor

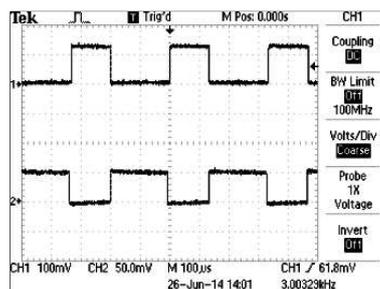
Hasil pengujian menunjukkan tegangan yang dihasilkan sensor tekanan linier terhadap tekanan air dengan rata-rata perubahan tegangan sebesar 0,1 volt/psi.

### B. Pengujian Rangkaian Pemicuan

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah mikrokontroler dan rangkaian driver dapat menghasilkan sinyal PWM untuk memicu mosfet. Mikrokontroler diprogram untuk menghasilkan pwm dengan frekuensi tertentu dan *duty cycle* diatur dengan potensiometer. Hasil pengujian sensor tekanan dapat dilihat pada tabel 2 dan gambar 13.

Tabel 2. Hasil pengujian PWM keluaran Mikrokontroler dan Optocoupler

Keluaran Mikrokontroler			Keluaran Optocoupler			Error (%)
Ton (μs)	Toff (μs)	D	Ton (μs)	Toff (μs)	D	
100	900	10	100	900	10	0
200	800	20	200	800	20	0
300	700	30	300	700	30	0
400	600	40	400	600	40	0
500	500	50	500	500	50	0
600	400	60	600	400	60	0
700	300	70	700	300	70	0
800	200	80	800	200	80	0
900	100	90	900	100	90	0



Gambar 13. Sinyal PWM keluaran Mikrokontroler dan rangkaian *optocoupler*

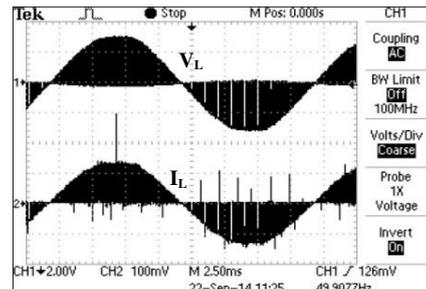
Bentuk gelombang pwm keluaran mikrokontroler sama dengan bentuk gelombang pwm keluaran optocoupler tetapi saling berkebalikan. Hal ini disebabkan pada rangkaian optocoupler terdapat rangkaian transistor sebagai *pull-up* yang membalik logika *high* menjadi *low* dan sebaliknya. PWM keluaran *optocoupler* tetap berupa sinyal kotak dengan *duty-cycle* yang sama dengan PWM keluaran mikrokontroler.

### C. Pengujian Snubber dan Mosfet

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui apakah MOSFET dapat berfungsi mencacah bentuk gelombang tegangan. Selain itu dapat dilihat pula apakah snubber dapat mengamankan mosfet dari tegangan paku.

Tabel 3. Hasil pengukuran beban lampu

Duty-cycle (%)	Tegangan (V)	Arus (A)
90	220	1
70	200	0.95
50	160	0.77
30	130	0.5
10	70	0.28

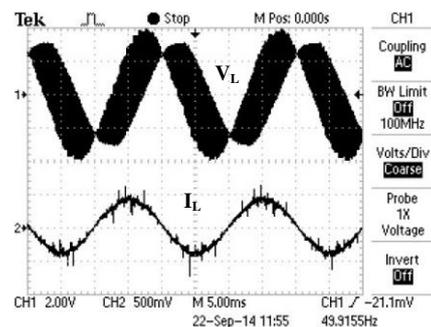


Gambar 14. Bentuk gelombang tegangan dan arus pada lampu  $D = 70\%$ , 2 V/div, 100 mV/div, 2.5 ms/div

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa semakin kecil *duty-cycle* PWM maka semakin kecil pula tegangan dan arus beban. Semakin lebar daerah yang tercacah sehingga tegangan dan arus rata-ratanya menjadi berkurang. Gambar 14 menunjukkan hasil pencacahan gelombang tegangan dan arus dengan frekuensi switching 7kHz.

Tabel 4. Hasil pengukuran beban motor induksi satu fasa ¼ HP

Duty-cycle (%)	Tegangan (V)	Arus (A)	Impedansi (Ohm)	Cos phi	Sudut	R	J <sub>sL</sub>	Induktansi (H)
90	220	1.4	157	0.38	67.666	59.714	145.355	0.463
70	200	1	200	0.56	55.944	112.000	165.699	0.528
50	170	0.8	212.5	0.86	30.683	182.750	108.437	0.345
30	125	0.5	250	0.91	24.494	227.500	103.652	0.330
10	30	0.2	150	0.95	18.194	142.500	46.837	0.149

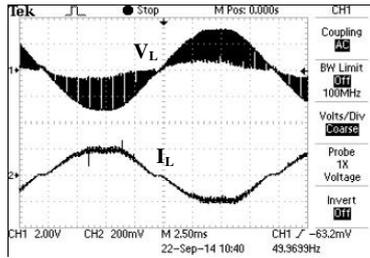


Gambar 15. Bentuk gelombang tegangan dan arus pada motor induksi satu fasa ¼ HP  $D = 70\%$ , 2 V/div, 500 mV/div, 5 ms/div

Tabel 4 juga menunjukkan semakin kecil *duty-cycle* PWM maka tegangan dan arus beban berkurang. Data *cos phi* dipergunakan untuk menghitung impedansi motor. Setelah mendapatkan nilai impedansi, nilai resistansi dan induktansi motor dihitung agar dapat digunakan dalam simulasi. Bentuk gelombang tegangan dan arus beban motor pada gambar 15 memperlihatkan bahwa rangkaian snubber mampu menekan tegangan paku hingga kurang dari tegangan masukan maksimum, yakni 311 Volt.

Tabel 5. Hasil pengukuran beban motor pompa

Duty-cycle (%)	Tegangan (V)	Arus (A)	Impedansi (Ohm)	Cos phi	Sudut	R	J <sub>sL</sub>	Induktansi
90	180	0.6	300	0.94	19.948	282	102.352	0.325
70	140	0.6	233.333	0.95	18.194	221.66	72.858	0.232
50	110	0.6	183.333	0.96	16.260	176	51.333	0.163
30	60	0.4	150	0.88	28.357	132	71.246	0.226
10	10	0.3	33.333	0.99	8.1096	33	4.702	0.014

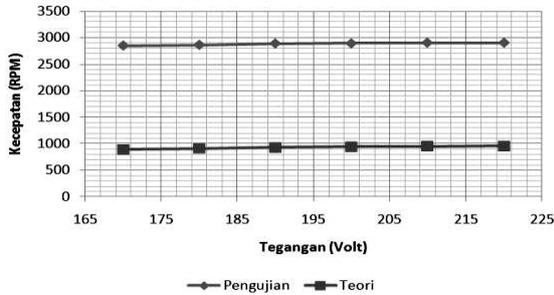


Gambar 16. Bentuk gelombang tegangan dan arus pada beban motor pompa D = 70%, 2 V/div, 200 mV/div, 2.5 ms/div

Sama seperti data sebelumnya, PWM AC Chopper, tabel 5 menunjukkan bahwa rangkaian PWM AC Chopper dapat membuat tegangan dan arus variabel sesuai dengan *duty-cycle* PWM. Arus beban motor memiliki bentuk yang lebih sinus dibandingkan dengan arus beban resistif.

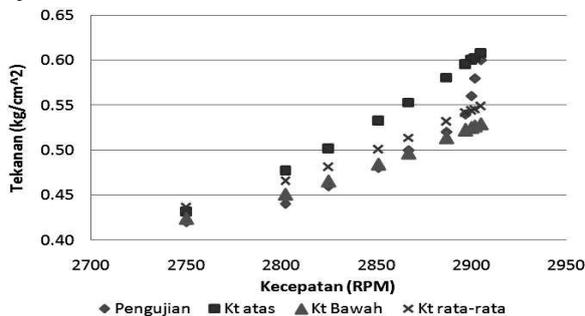
#### D. Pengujian Sistem Keseluruhan

Pengujian ini bertujuan mengetahui apakah sistem pengendalian kecepatan motor pompa air tekanan konstan dapat bekerja dengan baik.



Gambar 17. Grafik tegangan terhadap kecepatan motor pompa

Grafik pada gambar 17 menunjukkan bahwa semakin kecil tegangan masukan maka kecepatan akan semakin menurun. Kecepatan saat tegangan nominal adalah 2905 rpm sedangkan kecepatan paling kecil yang bisa dicapai adalah 2850 rpm pada tegangan 150 volt. Di bawah tegangan tersebut motor tidak dapat berputar karena torsi yang dihasilkan kurang dari torsi beban. Hal ini dibuktikan oleh perhitungan secara teori dimana kedua grafik tersebut sejalan.



Gambar 18. Grafik kalibrasi tekanan output terhadap kecepatan pompa

Pada grafik 18 dapat dilihat bentuk grafik teori yang sejalan dengan grafik pengujian. Grafik teori diplot berdasarkan tiga nilai konstanta Kt yang didapatkan dari hasil pengujian. Data yang digunakan adalah tekanan terbesar, tekanan terkecil dan tekanan rata-rata. Selisih tekanan yang bisa dicapai adalah

maksimal 0,2 kg/cm<sup>2</sup>. Grafik secara teori sejalan dengan grafik hasil pengujian.

Tabel 6. Data sebelum pemasangan alat kontrol

Jumlah keran dibuka	Tegangan (V)	Arus (A)	Kecepatan (RPM)	Tekanan (Kg/cm <sup>2</sup> )	Debit tiap keran (ml/s)				
					Keran 1	Keran 2	Keran 3	Keran 4	Keran 5
1	220	0,9	2898	1	90	-	-	-	-
2	220	0,9	2898	0,85	88	75	-	-	-
3	220	0,9	2898	0,8	85	65	55	-	-
4	220	0,9	2898	0,7	80	60	53	45	-
5	220	0,9	2898	0,66	75	55	50	42	37

Tabel 7. Data sesudah pemasangan alat kontrol

Jumlah keran dibuka	Tegangan (V)	Arus (A)	Kecepatan (RPM)	Tekanan (Kg/cm <sup>2</sup> )	Debit tiap keran (ml/s)				
					Keran 1	Keran 2	Keran 3	Keran 4	Keran 5
1	150	1,2	2605	0,8	88	-	-	-	-
2	175	1	2848	0,8	87	74	-	-	-
3	220	0,9	2898	0,8	85	65	55	-	-
4	220	0,9	2898	0,7	80	60	53	45	-
5	220	0,9	2898	0,66	75	55	50	42	37

Pada tabel 6 terlihat bahwa tekanan yang dihasilkan pompa semakin kecil ketika semakin banyak keran yang dibuka. Hal itu disebabkan semakin besarnya tahanan yang diberikan oleh sistem terhadap pompa.

Setelah alat kontrol dipasang, tekanan air dapat disesuaikan dengan set-point, yakni 0,8 kg/cm<sup>2</sup> saat satu keran hingga dua keran dibuka. Saat keran ketiga dibuka, kecepatan motor pompa telah mencapai nominal sehingga tidak dapat lagi menaikkan tekanan.

#### IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Dengan sistem pengendalian kecepatan motor, pompa air dapat menghasilkan tekanan konstan. Tekanan dapat dipertahankan sesuai dengan *set-point* sebesar 0,8 kg/cm<sup>2</sup> saat satu keran dibuka hingga tiga keran dibuka. Setelah lebih dari tiga keran dibuka, tekanan air menurun. Hal ini disebabkan karena tegangan dan kecepatan motor telah mencapai nominal. Sistem ini cukup untuk digunakan pada instalasi pipa dengan 5 keran.
- 2) Debit air di setiap keran tidak konstan meski tekanan air yang dihasilkan pompa telah dipertahankan konstan. Konfigurasi keran serial menyebabkan semakin jauh jarak keran dari pompa, debit air akan semakin kecil. Hal ini disebabkan karena adanya rugi-rugi di setiap keran.
- 3) PWM ac chopper mampu mengendalikan kecepatan motor lewat pengaturan tegangan. PWM ac chopper dapat menghasilkan tegangan yang bervariasi dengan mengatur *duty-cycle* PWM. Perubahan tegangan masukan motor menyebabkan perubahan torsi motor. Berdasarkan kurva torsi-slip, perubahan torsi motor menyebabkan titik potong torsi motor dan torsi beban bergeser di sepanjang kurva torsi beban. Dari pergeseran titik potong tersebut, kecepatan motor berubah. Namun, rentang kecepatan yang bisa diatur sangat sempit sehingga rentang pengaturan tekanan yang bisa dicapai juga sempit.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hart, D. W. (2011). *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.
- [2] McMurray, W. (1972). Optimum Snubber for Power Semiconductors. *IEEE Transactional on Industry Application* , 593-600.
- [3] Rashid, M. H. (2004). *Power Electronics Circuits, Devices and Applications*. New Jersey: Pearson Education.
- [4] Zuhail. (1989). *Dasar Tenaga Listrik*. Bandung: Penerbit ITB.