

**ANALISIS PENGHEMATAN ENERGI LISTRIK PADA SISTEM
POMPA AIR MENGGUNAKAN *ALTIVAR-312***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

IRFAN ADITYA PRIMANTO

NIM. 115060300111011

KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS PENGHEMATAN ENERGI LISTRIK PADA SISTEM
POMPA AIR MENGGUNAKAN *ALTIVAR-312***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



IRFAN ADITYA PRIMANTO

NIM. 115060300111011

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus sidang skripsi
pada tanggal 7 Oktober 2015

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Soeprapto, M.T.
NIP. 19561020 198903 1 001

Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M. Sc.
NIP. 19680122 199512 2 001

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS PENGHEMATAN ENERGI LISTRIK PADA SISTEM
POMPA AIR MENGGUNAKAN *ALTIVAR-312***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

IRFAN ADITYA PRIMANTO

NIM. 115060300111011

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus sidang skripsi
pada tanggal 7 Oktober 2015

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19730520 200801 1 013

Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.
NIP. 19580609 198703 1 003

Dosen Penguji III

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena dengan berkat rahmat dan karunia serta ridho-Nya penyusunan skripsi ini dengan judul “Analisis Penghematan Energi Listrik pada Sistem Pompa Air Menggunakan *Altivar-312*” dapat diselesaikan. Penulis menyadari bahwa kajian ini tak akan mencapai titik akhir penyelesaiannya tanpa bantuan berbagai pihak, karenanya penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. M. Azis Muslim, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
2. Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
3. Ir. Soeprpto, M.T selaku dosen pembimbing pada penyusunan skripsi ini.
4. Dr. Rini Nur Hasanah, M.T., M.Sc selaku dosen pembimbing pada penyusunan skripsi ini.
5. Kedua orang tua tercinta, Efri Gunawan dan Susi Mirzawati yang senantiasa mendoakan, memberikan nasihat, kasih sayang, dan perhatian selama ini.
6. Kedua adik tersayang, Fauzi Rahmadi Primanto dan M. Abimukti Primanto yang senantiasa mendoakan dan memberikan semangat selama ini.
7. Saudara – saudaraku “Happy Electrical Power” yang selalu membantu dalam pembuatan skripsi ini baik dalam bentuk nasihat, doa maupun kritikan yang membangun.
8. Bapak dan Ibu dosen serta karyawan Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.
9. Serta semua pihak yang tak dapat disebutkan satu persatu yang telah turut membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian skripsi ini.

Sebuah penantian yang panjang telah berakhir, yang kemudian menjadi sebuah titik perjalanan baru. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan

Malang, Juli 2015

Penyusun

DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
RINGKASAN	ix
SUMMARY	xi
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan masalah	2
1.3 Batasan masalah.....	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika laporan.....	3
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Pengenalan umum motor induksi 3 fasa	4
2.2 Konstruksi motor 3 fasa	4
2.2.1 Stator	5
2.2.2 Rotor	5
2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Fasa	7
2.4 Rangkaian ekivalen motor induksi	9
2.5 Aliran daya motor induksi	10
2.6 Parameter motor induksi tiga fasa	11
2.6.1 Pengujian Tahanan Stator (<i>DC Test</i>).....	11
2.6.2 Pengujian Rotor Tertahan (<i>Block Rotor Test</i>).....	12
2.6.3 Pengujian tanpa beban (<i>No Load Test</i>)	13
2.7 Metode pengaturan kecepatan motor	15
2.7.1 Mengatur tegangan sumber	15
2.7.2 Mengatur frekuensi dan tegangan sumber	15
2.7.3 Mengatur impedansi stator.....	17
2.7.4 Mengatur resistansi rotor	17
2.8 Pengertian sistem perpompaan	18



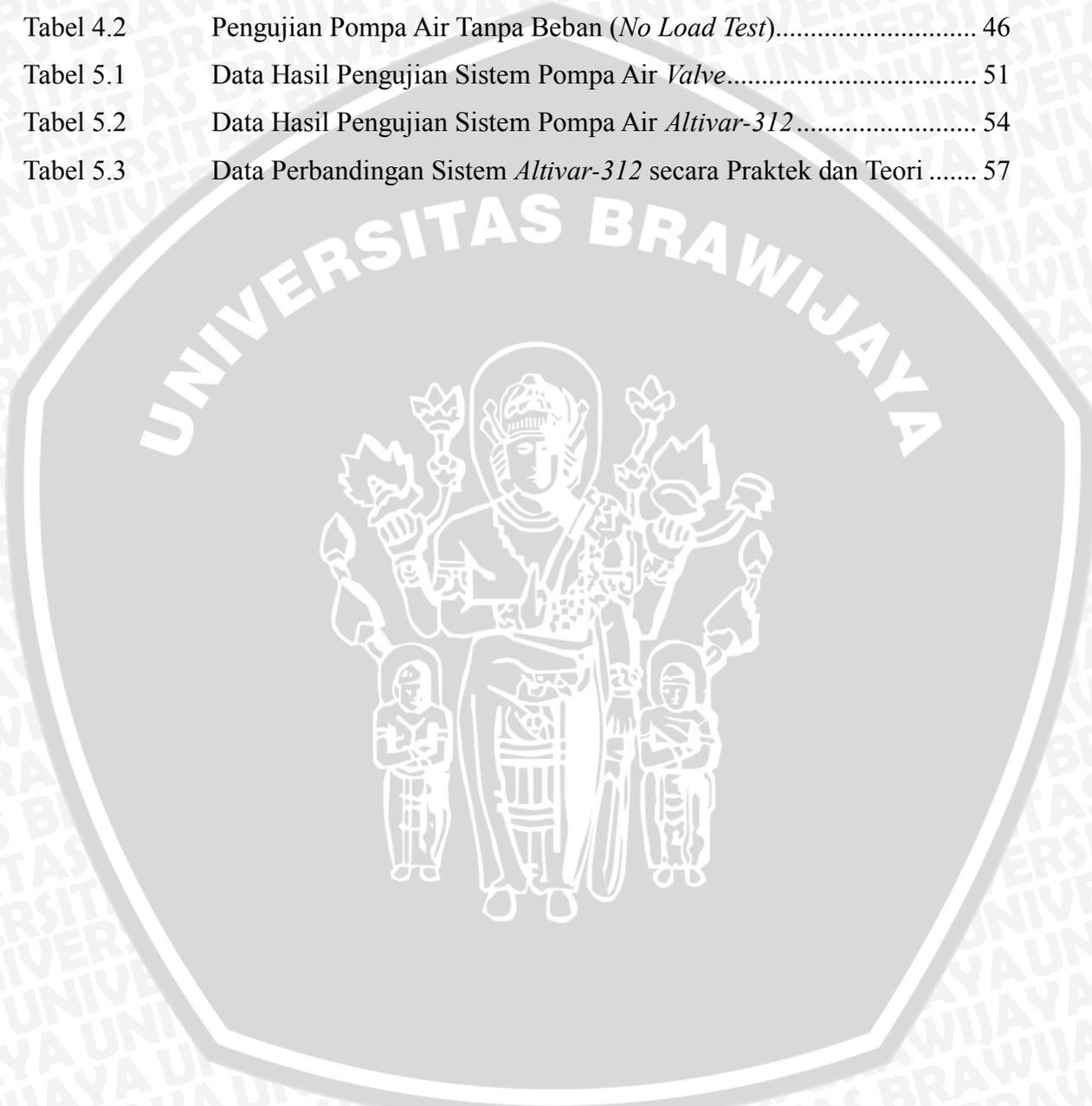
2.9 Jenis-jenis pompa.....	19
2.9.1 Pompa perpindahan positif	19
2.9.2 Pompa dinamik	20
2.10 Pompa sentrifugal	20
2.10.1 Prinsip kerja pompa sentrifugal	20
2.10.2 Komponen pompa sentrifugal.....	21
2.11 <i>Inverter</i> 3 fasa	23
2.11.1 <i>Six step inverter</i>	23
2.11.2 <i>PWM Inverter</i>	26
2.12 <i>Variable Speed Drive</i>	28
2.13 <i>Water flow meter</i>	30
3. METODOLOGI PENELITIAN	31
3.1 Studi literatur	31
3.2 Perancangan Sistem	32
3.3 Pengujian dan Analisis.....	32
3.4 Pengambilan Kesimpulan	32
4. PERANCANGAN SISTEM	33
4.1 Perancangan diagram balok sistem secara keseluruhan.....	33
4.2 Penentuan spesifikasi setiap balok.....	34
4.2.1 Spesifikasi <i>Variable Speed Drive</i>	34
4.2.2 Spesifikasi motor induksi 3 fasa	36
4.2.3 Spesifikasi pompa air.....	44
4.2.4 Spesifikasi <i>Water Flow Meter</i>	46
5. ANALISIS DAN PERHITUNGAN	50
5.1 Pengujian sistem pompa air <i>Valve</i>	50
5.2 Pengujian sistem pompa air <i>Altivar-312</i>	53
5.3 Analisa penghematan energi	58
5.4 Perhitungan biaya penghematan energi	58
5.4.1 Perhitungan biaya sistem <i>Valve</i>	59
5.4.2 Perhitungan biaya sistem <i>Altivar-312</i>	60
6. KESIMPULAN DAN SARAN	61
6.1 Kesimpulan	61
6.2 Saran	61

DAFTAR PUSTAKA.....	62
7. LAMPIRAN	63
Lampiran 1	63
Lampiran 2.....	65



DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
Tabel 4.1	Pengujian Motor Induksi Tanpa Beban (<i>No Load Test</i>).....	42
Tabel 4.2	Pengujian Pompa Air Tanpa Beban (<i>No Load Test</i>).....	46
Tabel 5.1	Data Hasil Pengujian Sistem Pompa Air <i>Valve</i>	51
Tabel 5.2	Data Hasil Pengujian Sistem Pompa Air <i>Altivar-312</i>	54
Tabel 5.3	Data Perbandingan Sistem <i>Altivar-312</i> secara Praktek dan Teori	57



DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Penampang Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa	4
Gambar 2.2	Komponen Stator Motor Induksi Tiga Fasa.....	5
Gambar 2.3	Rotor Belit Motor Induksi Tiga Fasa (a) Tampilan Close-Up Bagian Slip Ring Rotor Belitan (b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan.....	6
Gambar 2.4	Skematik Diagram Motor Induksi Rotor Belitan.....	6
Gambar 2.5	Rotor Sangkar Motor Induksi Tiga Fasa (a) Rotor Sangkar Tupai dan Bagian-bagiannya (b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai ...	7
Gambar 2.6	Arah Putaran Motor Induksi	8
Gambar 2.7	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	9
Gambar 2.8	Diagram Aliran Daya pada Motor Induksi	10
Gambar 2.9	Rangkaian Pengukuran Untuk Test DC	12
Gambar 2.10	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi pada Percobaan <i>Block Rotor Test</i>	12
Gambar 2.11	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tanpa Beban	14
Gambar 2.12	Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (V_t diubah).....	15
Gambar 2.13	Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (V_t/f diubah)	16
Gambar 2.14	Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (Z diubah)	17
Gambar 2.15	Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (R diubah)	18
Gambar 2.16	Sistem Perpompaan di Industri.....	19
Gambar 2.17	Lintasan Aliran Pompa Sentrifugal.....	21
Gambar 2.18	Pompa Sentrifugal dan Komponennya	21
Gambar 2.19	<i>Impeller</i>	22
Gambar 2.20	Batang Torak: (a) Poros Vertikal (b) Poros Horizontal.....	22
Gambar 2.21	Penampang pompa Sentrifugal dengan Wadah <i>Volute</i>	23
Gambar 2.22	Rangkaian <i>Inverter</i> Tiga Fasa	24
Gambar 2.23	Urutan Pensaklaran Metode <i>Six-Step Pulse</i>	24
Gambar 2.24	Tegangan keluaran <i>line to line</i>	24
Gambar 2.25	Tegangan Keluaran <i>Line to Neutral</i> untuk Konfigurasi Beban Y.....	25
Gambar 2.26	Arus Fasa A untuk Beban RL	25
Gambar 2.27	Gelombang <i>Carrier</i> dan Referensi dari PWM 3 fasa	27

Gambar 2.28	Keluaran Tegangan Line to Line dari PWM 3 Fasa.....	27
Gambar 2.29	Rangkaian <i>Variable Speed Drive</i>	28
Gambar 2.30	Macam-macam <i>Variable Speed Drive</i>	29
Gambar 2.31	<i>Water Flow Meter</i>	30
Gambar 3.1	Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	31
Gambar 4.1	Diagram Balok Sistem Pompa Air <i>Valve</i>	33
Gambar 4.2	Diagram Balok Sistem Pompa Air <i>Altivar-312</i>	34
Gambar 4.3	Spesifikasi Schneider <i>Altivar-312</i> tipe ATV312HU11N4	35
Gambar 4.4	Diagram Balok Pengujian <i>Altivar-312</i>	35
Gambar 4.5	Gelombang <i>Altivar-312</i> pada Frekuensi 50.51 Hz	36
Gambar 4.6	Gelombang <i>Altivar-312</i> pada Frekuensi 29.76 Hz	36
Gambar 4.7	Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa.....	37
Gambar 4.8	Rangkaian Pengujian DC (<i>DC test</i>).....	38
Gambar 4.9	Rangkaian Pengujian Rotor ditahan (<i>Blocked Rotor Test</i>).....	39
Gambar 4.10	Perbandingan Reaktansi Bocor	40
Gambar 4.11	Rangkaian Pengujian Motor Induksi Tanpa Beban (<i>No Load Test</i>).....	41
Gambar 4.12	Lengkung Daya Sebagai Fungsi Tegangan.....	43
Gambar 4.13	Grafik Hubungan Tegangan Masukan Motor Induksi Tiga Fasa terhadap Daya Nyata Masukan.....	44
Gambar 4.14	Spesifikasi Pompa Air.....	45
Gambar 4.15	Rangkaian Pengujian Pompa Air Tanpa Beban (<i>No Load Test</i>)	45
Gambar 4.16	Grafik Hubungan Tegangan Masukan Pompa Air terhadap Daya Nyata Masukan.....	46
Gambar 4.17	Spesifikasi <i>Water Flow Meter</i>	47
Gambar 4.18	Diagram Balok Pengujian <i>water flow meter</i>	47
Gambar 4.19	Gelombang Tegangan Keluaran <i>water flow meter</i> pada Frekuensi 87.11 Hz.....	48
Gambar 4.20	Gelombang Tegangan Keluaran <i>water flow meter</i> pada Frekuensi 43.78 Hz.....	48
Gambar 5.1	Rangkaian Pengukuran Sistem Pompa Air <i>Valve</i>	50
Gambar 5.2	Grafik Hubungan Daya Nyata Masukan Motor terhadap Debit Air pada Sistem <i>Valve</i>	51
Gambar 5.3	Rangkaian Pengukuran Sistem Pompa Air <i>Altivar-312</i>	53
Gambar 5.4	Grafik Hubungan Daya Nyata Masukan Motor terhadap Debit Air pada	

	Sistem <i>Altivar-312</i>	54
Gambar 5.5	Grafik Hubungan Daya Nyata Masukan terhadap Daya Keluaran Mekanik pada Sistem <i>Altivar-312</i>	57
Gambar 5.6	Tarif Tenaga Listrik PLN untuk Keperluan Industri	59



DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
Lampiran 1	Perhitungan P_{f+w} motor.....	63
Lampiran 2	Perhitungan P_{f+w} pompa	65



RINGKASAN

Irfan Aditya Primanto, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Oktober 2015, *Analisis Penghematan Energi Listrik pada Sistem Pompa Air Menggunakan Altivar-312*, Dosen Pembimbing: Soeprpto dan Rini Nur Hasanah.

Penggunaan motor listrik sebagai pompa air merupakan contoh aplikasi motor listrik yang kurang efisien. Pada sistem pompa air konvensional, banyak sedikitnya debit air dilakukan dengan cara mengatur *Valve* yang dioperasikan secara manual, yaitu dengan membuka dan menutup *Valve* tersebut. Saat membutuhkan debit air dalam jumlah sedikit putaran motor atau pompa akan tetap berputar maksimum layaknya memerlukan debit air dalam jumlah banyak, sehingga terjadilah pemborosan energi listrik.

Seiring perkembangan zaman, ditemukanlah cara yang paling efisien untuk melakukan penghematan energi terhadap sistem pompa air, yaitu dengan cara memodifikasi teknik pengendalian putarannya dengan menggunakan alat yang bernama *Variable Speed Drive* (VSD) yang pada penelitian ini menggunakan jenis *Altivar-312*.

Tujuan akhir yang diharapkan dalam penelitian ini adalah dapat menganalisis dan menghitung berapa besar energi listrik yang dapat dihemat secara teknis dan ekonomis dalam penggunaan *Altivar-312* di sistem pompa air.

Berdasarkan hasil pengujian didapatkan bahwa sistem pompa yang menggunakan *Altivar-312* 43% lebih hemat konsumsi energi listriknya dibandingkan sistem yang menggunakan *valve*.

Kata kunci: penghematan energi listrik, *Variable Speed Drive*, *Altivar-312*, *Valve*, pompa air.

SUMMARY

Irfan Aditya Primanto, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, October 2015, Analysis of Electricity Savings on Water Pump System Using *Altivar-312*, Academic Supervisor: Soeprapto and Rini Nur Hasanah.

Using electrical machine as a water pump is the one example of less efficient application. On conventional water pump system, the amount of water is defined by Valve that operate manually (open and close the knob). When needs less amount of water, the speed rotation of the motor or pump will spinning like needs huge amount of water, it will waste huge amount of the electricity.

Now a days, the most efficient way to save the electricity on water pump system has been founded. By using a device that called Variable Speed Drive (VSD) which can maintain the speed control, where in this research using *Altivar-312*.

The final goal of this research is to analyze and calculate the electricity that can be save technically dan economically in water pump system using *Altivar-312*

Based on test results, obtained that the *Altivar-312* water pump system is 43% have less consumption in electricity than the Valve water pump system.

Keywords: electricity savings, Variable Speed Drive, *Altivar-312*, Valve, water pump.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Aplikasi motor listrik pada zaman sekarang sangatlah luas dan dapat diterapkan di banyak bidang. Banyak gedung maupun pabrik menggunakan motor listrik sebagai penggerak utamanya. Penggunaan motor – motor listrik ini membutuhkan energi listrik yang cukup besar. Jika tanpa upaya penghematan, penggunaan motor – motor listrik ini akan menyebabkan pemborosan energi listrik yang cukup besar.

Penggunaan motor sebagai pompa air bisa menjadi contoh aplikasi motor listrik yang kurang efisien. Hampir di setiap gedung dan pabrik menggunakannya. Pada sistem pompa air konvensional, banyak sedikitnya debit air dilakukan dengan cara mengatur *Valve* yang dioperasikan secara manual, yaitu dengan membuka dan menutup *Valve* tersebut. Saat debit air dibutuhkan dalam jumlah kecil putaran pompa air akan tetap berputar semaksimal mungkin. Pada umumnya penggunaan pompa air ini digunakan terus – menerus sehingga dapat menyebabkan pemborosan energi listrik.

Setiap energi listrik yang dibangkitkan maka semakin banyak energi *Fossil* yang dibutuhkan. Mengingat harga energi *Fossil* yang semakin tinggi karena sumber *Fossil* sendiri semakin sedikit, hal itu membuat para *engineer* berlomba-lomba untuk menemukan teknologi dengan tujuan penghematan energi listrik.

Dalam perkembangan teknologi khususnya di bidang elektronika daya, diciptakanlah sebuah alat yang bernama *Variable Speed Drive* (VSD). VSD yang pada penelitian ini menggunakan *Altivar-312* mampu melakukan penghematan energi listrik pada sistem pompa air. Dengan mengendalikan putaran motor atau pompa air dengan prinsip merubah tegangan dan frekuensi sumber yang akan disuplai ke motor, dimana putaran motor atau pompa mempengaruhi banyaknya debit air. Selain itu VSD dapat mengelola lonjakan arus *starting* sehingga dapat dilakukan upaya penghematan energi yang cukup besar.

Penelitian ini melakukan pengukuran dan analisis konsumsi energi listrik motor yang dioperasikan sebagai penggerak pompa air terhadap kedua sistem yaitu sistem *Altivar-312* dan *Valve* sebagai pengatur banyaknya debit air. Hal ini dilakukan untuk dapat mengetahui seberapa besar penghematan energi listrik yang dapat dicapai secara teknis dan ekonomis.

1.2 Rumusan masalah

Agar dapat diketahui apa yang akan dikaji dalam analisis ini, terdapat beberapa perumusan masalah. Rumusan masalah tersebut antara lain:

1. Berapa besar perbandingan konsumsi energi listrik motor penggerak pompa air dari sistem yang menggunakan *Altivar-312* dan *Valve* sebagai pengatur banyaknya debit air.
2. Berapa besar efisiensi maksimum dan efisiensi rata-rata yang dapat diperoleh dari sistem pompa air yang menggunakan *Altivar-312* bila dibandingkan dengan sistem *Valve*.
3. Berapa besar energi listrik dan biaya penggunaan energi listrik yang dapat dihemat setiap bulannya dari sistem pompa air yang menggunakan *Altivar-312*.

1.3 Batasan masalah

Akibat banyaknya kemungkinan yang akan terjadi dalam analisis ini, dibutuhkan batasan-batasan masalah. Batasan masalah tersebut antara lain:

1. *Variable Speed Drive* yang digunakan adalah Schneider *Altivar-312* tipe ATV312HU11N4 dengan daya max motor 1.1 HP dan 1.5 kW.
2. Motor yang dioperasikan sebagai penggerak pompa air adalah motor jenis arus bolak balik induksi 3 fasa LEYBOLD-DIDACTIC GMBH dengan dengan tegangan 380 V, arus 1,1 A, daya 0,33 kW dan hubungan Y.
3. Pompa air yang digunakan adalah merek SHIMIZU tipe PN-125 BIT.
4. Pompa air dioperasikan sebagai beban mekanik dengan cara mengkopel ke motor, bukan sebagai motor.
5. Sistem ini menggunakan sistem *open loop*.
6. Membahas kedua sistem berdasarkan sisi elektrik saja.

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan energi listrik dari kedua sistem yang menggunakan *Altivar-312* dan *Valve* sebagai pengatur banyaknya jumlah debit air, menghitung seberapa berapa besar efisiensi yang dapat diperoleh dari sistem pompa air yang menggunakan *Altivar-312*, menghitung seberapa besar energi dan biaya listrik yang dapat dihemat oleh sistem pompa yang menggunakan *Altivar-312*

1.5 Manfaat

Manfaat dari penulisan penelitian ini adalah untuk memberikan rujukan tentang fungsi dari penggunaan *Altivar-312* pada sistem pompa air.

1.6 Sistematika laporan

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian dan untuk mendukung permasalahan yang diteliti.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tahapan penyelesaian skripsi yang meliputi studi literatur, perancangan sistem, analisis dan perhitungan sampai kesimpulan dan saran.

BAB IV : PERANCANGAN SISTEM

Berisi langkah-langkah yang dilakukan untuk merancang sebuah sistem yang meliputi perancangan tiap elemen sistem, penentuan spesifikasi dan pengujian alat yang diperlukan serta merealisasikan sistem tersebut.

BAB V : PENGUJIAN DAN ANALISIS

Berisi pengujian dan pengambilan data dari kedua sistem yang kemudian hasilnya digunakan untuk analisis perbandingan kedua sistem tersebut.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari perancangan dan perhitungan masing - masing sistem serta saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

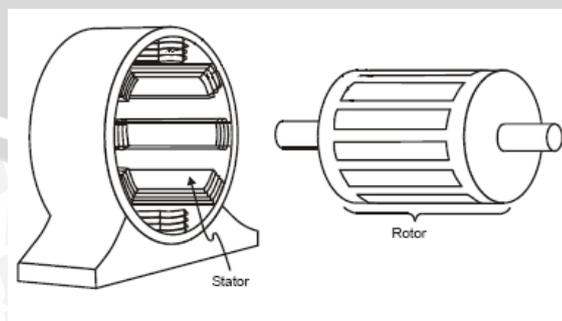
2.1 Pengenalan umum motor induksi 3 fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik arus bolak-balik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Dinamakan motor induksi karena pada kenyataannya arus rotor motor ini bukan diperoleh dari suatu sumber listrik, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar. Dalam kenyataannya, motor induksi dapat diperlakukan sebagai sebuah transformator, yaitu dengan kumparan stator sebagai kumparan primer yang diam, sedangkan kumparan rotor sebagai kumparan sekunder yang berputar.

Motor induksi tiga fasa berputar pada kecepatan yang pada dasarnya adalah konstan, mulai dari tidak berbeban sampai mencapai keadaan beban penuh. Kecepatan putaran motor ini dipengaruhi oleh frekuensi, dengan demikian pengaturan kecepatan tidak dapat dengan mudah dilakukan terhadap motor ini. Walaupun demikian, motor induksi tiga fasa memiliki beberapa keuntungan, yaitu sederhana, konstruksinya kokoh, harganya relatif murah, mudah dalam melakukan perawatan, dan dapat diproduksi dengan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan industri.

2.2 Konstruksi motor 3 fasa

Sebuah motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu stator yang merupakan bagian yang diam, dan rotor sebagai bagian yang berputar sebagaimana diperlihatkan pada gambar 2.1. Antara bagian stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit, dengan jarak berkisar dari 0,4 mm sampai 4 mm.

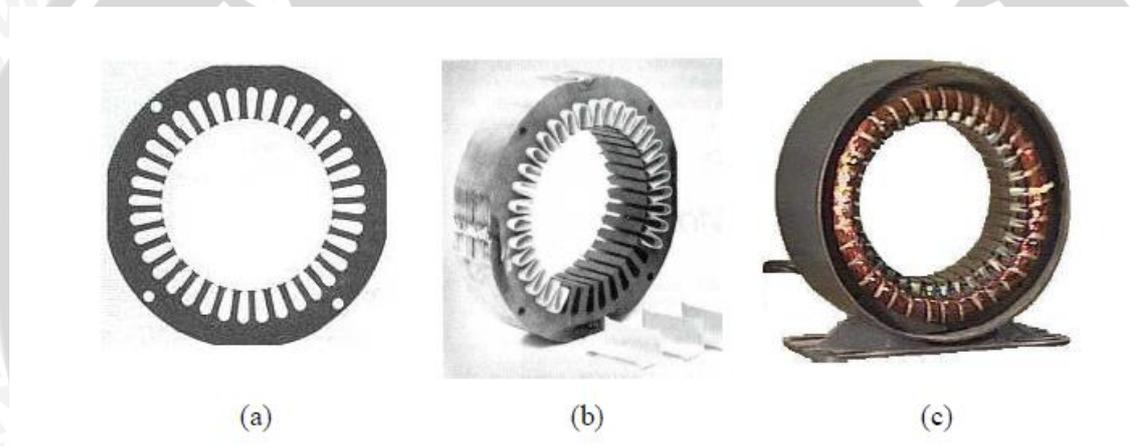


Gambar 2.1 Penampang Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa

Sumber : J.Hutagaol (2010:9)

2.2.1 Stator

Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas (Gambar 2.2.(b)). Tiap elemen laminasi inti dibentuk dari lempengan besi (Gambar 2.2.(a)). Tiap lempengan besi tersebut memiliki beberapa alur dan beberapa lubang pengikat untuk menyatukan inti. Tiap kumparan tersebar dalam alur yang disebut belitan fasa dimana untuk motor tiga fasa, belitan tersebut terpisah secara listrik sebesar 120 derajat. Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis. Kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.2.(c)). Berikut ini contoh lempengan laminasi inti, lempengan inti yang telah disatukan, belitan stator yang telah dilekatkan pada cangkang luar untuk motor induksi tiga fasa.



Gambar 2.2 Komponen Stator Motor Induksi Tiga Fasa

- (a) Lempengan Inti
- (b) Tumpukan Inti dengan Kertas Isolasi pada Beberapa Alurnya
- (c) Tumpukan Inti dan Kumparan dalam Cangkang Stator.

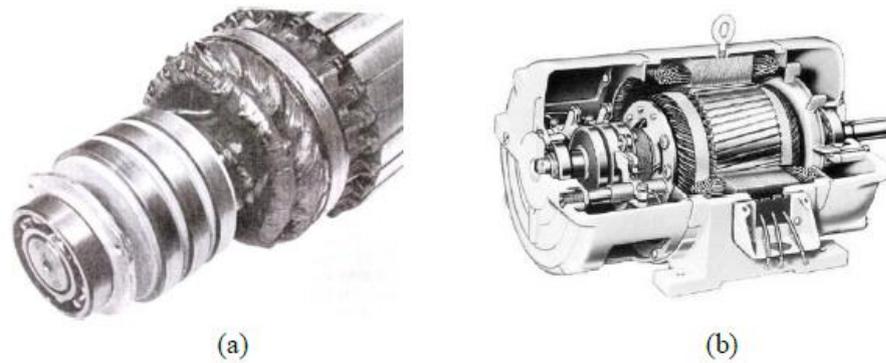
Sumber: J.Hutagaol (2010:10)

2.2.2 Rotor

Berdasarkan jenis rotornya, motor induksi tiga fasa dapat dibedakan menjadi dua jenis, yang juga akan menjadi penamaan untuk motor tersebut, yaitu rotor belitan (*wound rotor*) dan rotor sangkar tupai (*squirrel cage rotor*).

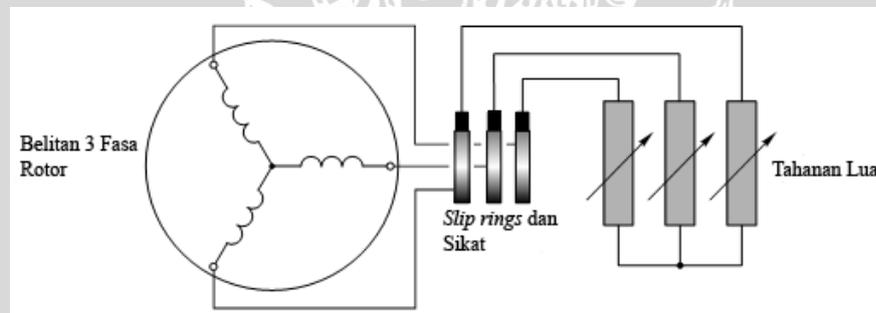
Jenis rotor belitan terdiri dari satu set lengkap belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan pada statornya. Belitan tiga fasa pada rotor belitan biasanya terhubung Y, dan masing-masing ujung dari tiga kawat belitan fasa rotor tersebut

dihubungkan pada slip ring yang terdapat pada poros rotor (gambar 2.3(a)). Belitan rotor ini kemudian dihubungkan singkatkan melalui sikat (*brush*) yang menempel pada slip ring (gambar 2.4), dengan menggunakan sebuah perpanjangan kawat untuk tahanan luar.



Gambar 2.3 Rotor Belit Motor Induksi Tiga Fasa (a) Tampilan Close-Up Bagian Slip Ring Rotor Belitan (b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan

Sumber: J.Hutagaol (2010:11)



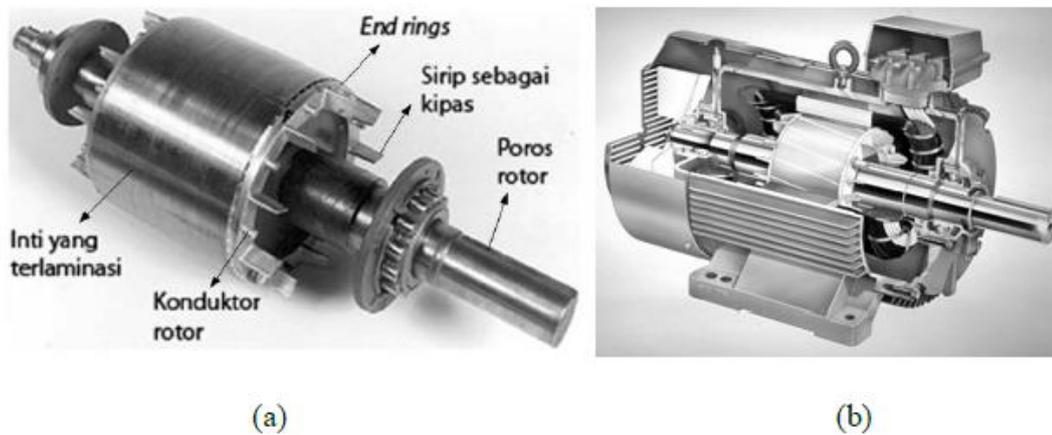
Gambar 2.4 Skematik Diagram Motor Induksi Rotor Belitan

Sumber: J.Hutagaol (2010:11)

Dari gambar 2.4. dapat dilihat bahwa semata-mata keberadaan slip ring dan sikat hanyalah sebagai penghubung belitan rotor ke tahanan luar (*external resistance*). Keberadaan tahanan luar disini berfungsi untuk membatasi arus *starting* yang besar. Tahanan luar ini kemudian secara perlahan dikurangi sampai resistansinya nol sebagaimana kecepatan motor bertambah mencapai kecepatan nominalnya. Ketika motor telah mencapai kecepatan nominalnya, maka tiga buah sikat akan terhubung singkat tanpa tahanan luar sehingga rotor belitan akan bekerja seperti halnya rotor

sangkar tupai.

Rotor sangkar mempunyai kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa hingga menyerupai sangkar tupai. Rotor terdiri dari tumpukan lempengan besi tipis yang dilaminasi dan batang konduktor yang mengitarinya (gambar 2.5(a)). Tumpukan besi yang dilaminasi disatukan untuk membentuk inti rotor. Aluminium (sebagai batang konduktor) dimasukan ke dalam slot dari inti rotor untuk membentuk serangkaian konduktor yang mengelilingi inti rotor. Rotor yang terdiri dari sederetan batang-batang konduktor yang terletak pada alur-alur sekitar permukaan rotor, ujung-ujungnya dihubung singkat dengan menggunakan cincin hubung singkat (*shorting ring*) atau disebut juga dengan *end ring*.



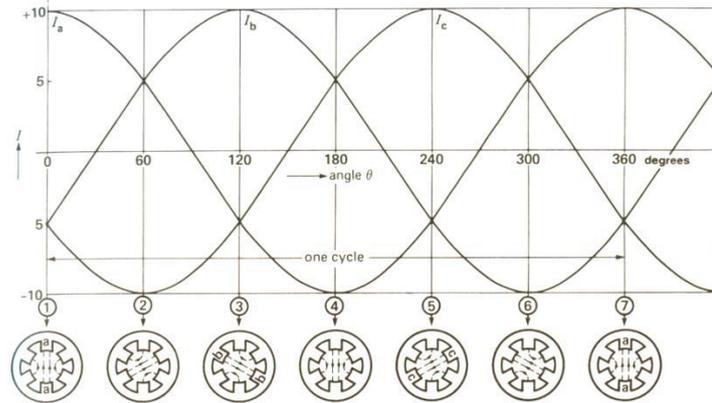
Gambar 2.5 Rotor Sangkar Motor Induksi Tiga Fasa (a) Rotor Sangkar Tupai dan Bagian-bagiannya (b) Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Sangkar Tupai

Sumber: J.Hutagaol (2010:12)

2.3 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Fasa

Belitan stator yang dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Medan magnet ini bergerak dengan kecepatan sinkron disekitar rotor. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar. Rotor akan berputar searah dengan medan putar yang dihasilkan stator.

Berikut adalah gambar gelombang sinusoidal tiga fasa dan arah putarnya pada stator yang berasal dari pembangkit listrik



Gambar 2.6 Arah Putaran Motor Induksi

Ria Prasetyo (2013:10)

Medan putar pada stator akan memotong konduktor – konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus pada rotor. Rotor tidak memperoleh sumber arus tertentu, tetapi merupakan arus terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara medan putar yang dihasilkan arus stator.

Dalam prakteknya motor tidak pernah bekerja pada kecepatan sinkron namun pada “kecepatan dasar” yang lebih rendah. Terjadinya perbedaan antara dua kecepatan tersebut disebabkan adanya “*slip* atau geseran”. *Slip* akan meningkat dengan meningkatnya beban. *Slip* hanya terjadi pada motor induksi. Persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung persentase *slip*:

$$\text{Slip} = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2-1)$$

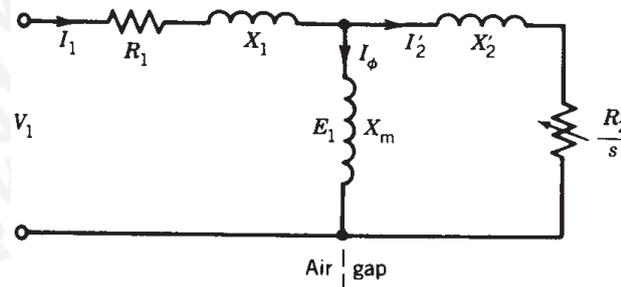
Dimana:

N_s = Kecepatan medan stator (rpm)

N_r = Kecepatan putar rotor (rpm)

2.4 Rangkaian ekivalen motor induksi

Secara umum rangkaian ekivalen motor induksi seperti berikut:



Gambar 2.7 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Sumber: P.C.SEN (1997:227)

Dimana:

V_1 = tegangan masukan (V)

E_1 = tegangan terinduksi (V)

s = slip motor

R_1 = resistansi stator (Ω)

R'_2 = resistansi rotor (Ω)

X_m = reaktansi permagnetan (Ω)

X_1 = reaktansi bocor di stator (Ω)

X'_2 = reaktansi bocor di rotor (Ω)

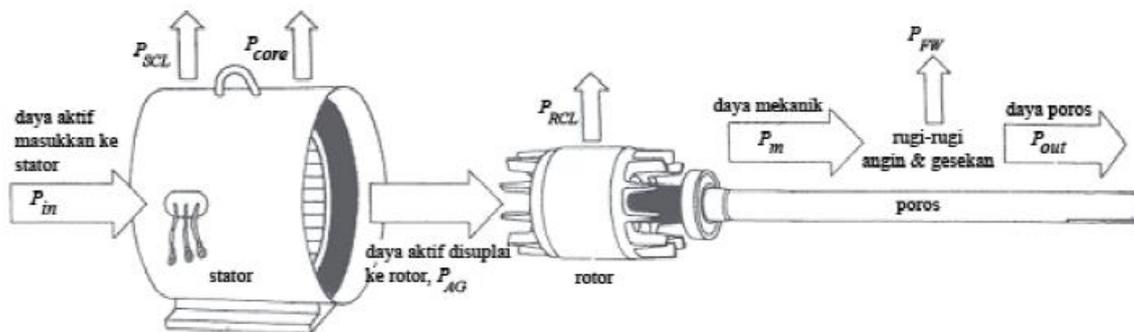
Dari gambar 2.7 tampak bahwa rangkaian ekivalen dapat diasumsikan dalam bentuk yang identik dengan sebuah transformator. Tidak ada perbedaan bentuk antara rangkaian ekivalen tersebut dengan belitan primer transformator, perbedaan hanya terletak pada besaran parameternya.

Misalnya, arus eksitasi I_M pada mesin induksi lebih besar karena celah udara, yaitu setinggi 30% - 50% dari arus nominalnya tergantung pada ukuran motornya, sedangkan pada transformator hanya 5%

Selain itu juga reaktansi bocor X_1 besar karena celah udara dan juga karena belitan stator dan rotor terdistribusi sepanjang celah udara dibandingkan transformator yang terkonsentrasi dalam sebuah inti

2.5 Aliran daya motor induksi

Secara umum aliran daya pada motor induksi dapat dijelaskan melalui gambar berikut.



Gambar 2.8 Diagram Aliran Daya pada Motor Induksi

Sumber: J.Hutagaol (2010:30)

Dari gambar 2.8 dapat dilihat bahwa, sebelum akhirnya daya masukan P_{in} dikonversikan menjadi daya keluaran P_{out} dalam bentuk daya mekanik, terdapat banyak rugi-rugi pada motor yang akan mengurangi besar daya masukan yang akan dikonversikan menjadi daya keluaran (mekanik).

$$P_{in} = P_{SCL} + P_{core} + P_{AG} \quad (2-2)$$

$$P_{AG} = P_{RCL} + P_{mek} \quad (2-3)$$

$$P_{mek} = P_{f+w} + P_{out} \quad (2-4)$$

Dari ketiga persamaan diatas dapat disimpulkan:

$$P_{in} = P_{SCL} + P_{core} + P_{RCL} + P_{f+w} + P_{out} \quad (2-5)$$

Dimana:

$$P_{in} = \text{daya masukan listrik (W)}$$

$$P_{SCL} = \text{rugi tembaga belitan stator (W)}$$

$$P_{core} = \text{rugi inti besi (W)}$$

$$P_{AG} = \text{daya celah udara (W)}$$

- P_{RCL} = rugi tembaga belitan rotor (W)
 P_{mek} = daya mekanik yang dibangkitkan yang menuju ke poros rotor (W)
 P_{f+w} = rugi gesek dan angin (W)
 P_{out} = daya mekanik yang terdapat di poros rotor (W)

2.6 Parameter motor induksi tiga fasa

Menentukan parameter rangkaian ekivalen motor induksi 3 fasa bertujuan untuk mendapatkan harga R_1 , X_1 , R'_2 , X'_2 , X_M dengan beberapa pengujian. Metode pengujiannya antara lain:

1. Pengujian DC (*DC test*)
2. Pengujian rotor ditahan (*Blocked rotor test*)
3. Pengujian tanpa beban (*No load test*)

2.6.1 Pengujian Tahanan Stator (*DC Test*)

Untuk menentukan besarnya tahanan stator R_1 dilakukan dengan test DC. Pada dasarnya tegangan DC diberikan pada belitan stator motor induksi. Karena arus yang disuplai adalah arus DC, maka tidak terdapat tegangan yang diinduksikan pada rangkaian rotor sehingga tidak ada arus yang mengalir pada rotor. Dalam keadaan demikian, reaktansi dari motor juga bernilai nol, oleh karena itu, yang membatasi arus pada motor hanya tahanan stator.

Untuk melakukan pengujian ini, arus pada belitan stator diatur pada nilai nominal, yang mana hal ini bertujuan untuk memanaskan belitan stator pada temperatur yang sama selama operasi normal. Apabila tahanan stator dihubung Y, maka besar tahanan stator/ fasa adalah :

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2 \times I_{DC}} \quad (2-7)$$

Bila stator dihubung delta, maka besar tahanan stator:

$$R_1 = \frac{3 \times V_{DC}}{2 \times I_{DC}} \quad (2-8)$$

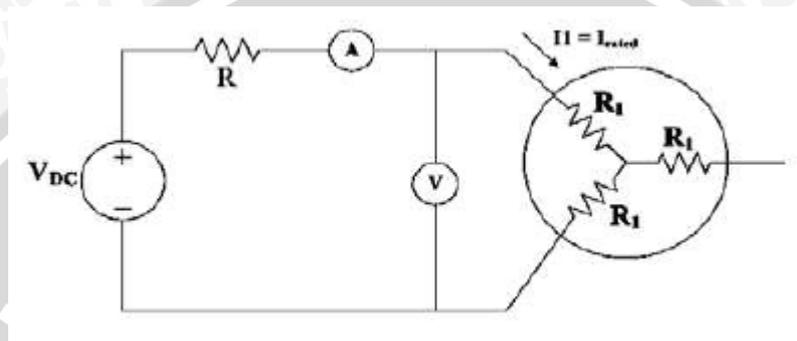
Dimana :

R_1 = Resistansi stator (Ω)

V_{DC} = Tegangan searah (V)

I_{DC} = Arus searah (A)

Gambar 2.9 menunjukkan salah satu bentuk pengujian DC pada stator motor induksi yang terhubung Y.

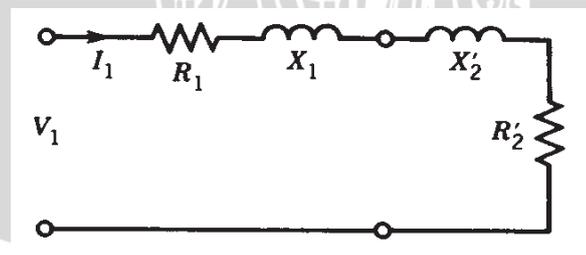


Gambar 2.9 Rangkaian Pengukuran Untuk Test DC

Sumber : M.Iqbal (2011:31)

2.6.2 Pengujian Rotor Tertahan (*Block Rotor Test*)

Pengujian ini dilakukan untuk mencari besaran X_1 , R'_2 , X'_2 . Untuk melakukan pengujian ini, tegangan AC disuplai ke stator dan arus yang mengalir diatur sampai beban penuh. Ketika arus telah menunjukkan nilai beban penuhnya, maka tegangan, arus, dan daya yang mengalir ke motor diukur. Rangkaian ekuivalen untuk pengujian ini dapat dilihat pada gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi pada Percobaan *Block Rotor Test*

Sumber : P.C. SEN (1997:231)

Sesudah tegangan dan frekuensi diatur, arus yang mengalir pada motor diatur dengan cepat, sehingga tidak timbul kenaikan temperatur pada rotor dengan cepat. Daya masukan yang diberikan kepada motor :

$$P_{in} = \sqrt{3}V_{in} \times I_{in} \times \cos \phi_{in} \quad (2-9)$$

$$P_{BR} = \sqrt{3}V_{BR} \times I_{BR} \times \cos \phi_{BR}$$

$$Z_{BR} = \frac{V_{BR}}{\sqrt{3} \times I_{BR}} \quad (2-10)$$

$$R_{BR} = \frac{P_{BR}}{3 \times I_{BR}^2} \quad (2-11)$$

$$X_{BR} = \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \quad (2-12)$$

$$X_{BR} = X_1 + X'_2 \quad (2-13)$$

Dimana :

V_{BR} = Tegangan masukan saat rotor ditahan (V)

I_{BR} = Arus masukan rotor saat ditahan (A)

Z_{BR} = Impedansi saat rotor ditahan (Ω)

R_{BR} = Arus rotor saat ditahan (Ω)

X_{BR} = Impedansi saat rotor ditahan (Ω)

2.6.3 Pengujian tanpa beban (*No Load Test*)

Pengujian tanpa beban pada motor induksi akan memberikan keterangan berupa besarnya X_m dan rugi – rugi tanpa beban. Biasanya pengujian tersebut dilakukan pada frekuensi yang diizinkan dan dengan tegangan tiga fasa dalam keadaan setimbang yang diberikan pada terminal stator.

Pada keadaan tanpa beban, tahanan yang terdapat pada beban mekanik sangatlah besar karena adanya slip yang kecil ($n_r \approx n_s$) sehingga rangkaian ekuivalen dianggap *open*. Karena rangkaian menjadi *open loop* maka arus yang mengalir ke bagian rotor sangatlah kecil sehingga rugi rugi pada rotor dapat diabaikan. Cabang paralel rotor dan cabang magnetisasi menjadi X_M di shunt dengan suatu tahanan yang sangat besar, dan besarnya reaktansi cabang paralel karenanya sangat mendekati X_M . Sehingga besar reaktansi yang tampak X_{TB} yang diukur pada terminal stator pada keadaan tanpa beban sangat mendekati $X_1 + X_M$, yang merupakan reaktansi sendiri dari stator, sehingga

$$X_{TB} = X_1 + X_M \quad (2-14)$$

$$Z_{TB} = \frac{V_{TB}}{\sqrt{3 \times I_{TB}}} \quad (2-15)$$

$$R_{TB} = \frac{P_{TB}}{3 \times I_{TB}^2} \quad (2-16)$$

$$X_{TB} = \sqrt{Z_{TB}^2 - R_{TB}^2} \quad (2-17)$$

Dimana :

P_{TB} = Daya nyata masukan saat tanpa beban (W)

V_{TB} = Tegangan masukan saat tanpa beban (V)

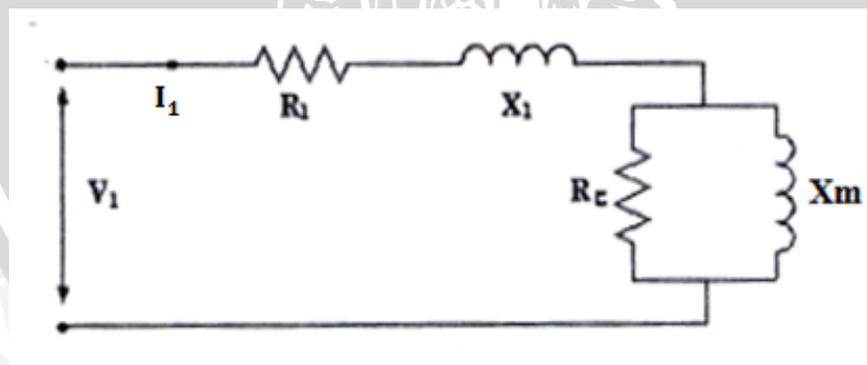
I_{TB} = Arus masukan saat tanpa beban (A)

Z_{TB} = Impedansi saat tanpa beban (Ω)

R_{TB} = Resistansi saat tanpa beban (Ω)

X_{BR} = Reaktansi bocor saat tanpa beban (Ω)

Rangkaian ekivalen keadaan tanpa beban dapat di gambarkan seperti gambar 2.11 dibawah.



Gambar 2.11 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tanpa Beban

Sumber : M.Iqbal (2011:30)

Apabila dituliskan secara matematis persamaan aliran daya motor induksi untuk keadaan tanpa beban :

$$P_{TB} = P_{core} + P_{SCL} + P_{f+w} \quad (2-18)$$

$$P_{core} + P_{f+w} = P_{in} - P_{SCL}$$

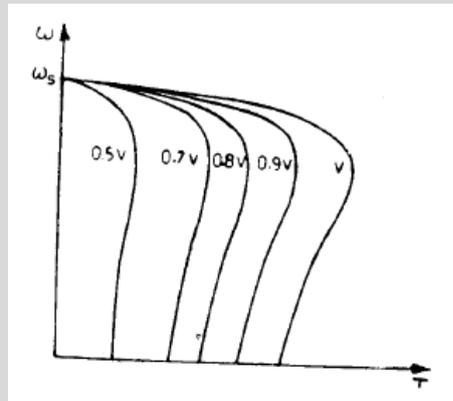
$$P_{SCL} = 3 I_{TB}^2 R_1 \quad (2-19)$$

2.7 Metode pengaturan kecepatan motor

Ada beberapa cara untuk mengatur kecepatan motor induksi yaitu:

2.7.1 Mengatur tegangan sumber

Dengan mengatur tegangan terminal motor induksi, maka karakteristik torsi terhadap kecepatan sudut motor induksi akan berubah seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.12 Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (V_t diubah)

Sumber : SK. Pillai (1989 : 68)

Dari gambar 2.12 terlihat bahwa perubahan tegangan berbanding lurus dengan torsi yang dibangkitkan, sehingga semakin kecil tegangan yang di suplai ke motor maka torsi yang dibangkitkan juga semakin kecil, begitu pula dengan sebaliknya.

2.7.2 Mengatur frekuensi dan tegangan sumber

Dengan merubah frekuensi sumber, maka kecepatan sinkron dari motor induksi akan berubah, dan begitu pula karakteristik kecepatan torsi dari motor induksi. Perubahan nilai frekuensi sumber harus diiringi dengan perubahan tegangan sumber, dikarenakan untuk menjaga fluksi pada celah udara agar nilainya tetap (SK. Pillai, 1989).

Dari persamaan 2-4 apabila P_{f+w} diabaikan

$$T_d = \frac{P_{mek}}{\omega_s(1-s)} \quad (2-20)$$

$$P_{mek} = 3 \times I_2'^2 \times \frac{R_2'(1-s)}{s} \quad (2-21)$$

Dari persamaan 2-20, maka:

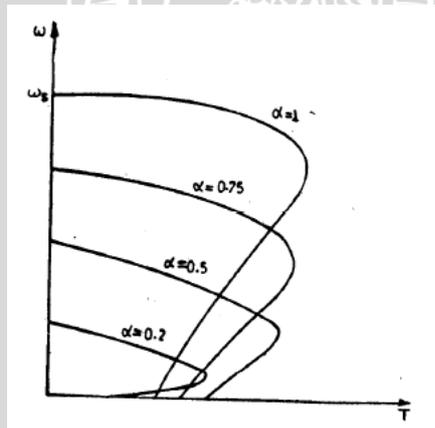
$$T_d = \frac{3}{\omega_s} \times I_2'^2 \times \frac{R_2'}{s} \quad (2-21)$$

Dari gambar 2.7 maka

$$I_2' = \frac{jX_m}{\left(\frac{R_2'}{s}\right) + j(X_2' + X_m)} I_1 \quad (2-22)$$

$$(I_2')^2 = \frac{(X_m)^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_2' + X_m)^2} I_1^2 \quad (2-23)$$

$\alpha = \frac{f}{f_{max}} < 1$ dimana f adalah frekuensi yang dioperasikan dan f_{max} frekuensi maksimum motor. Maka akan didapatkan karakteristik kecepatan-torsi seperti pada gambar berikut.

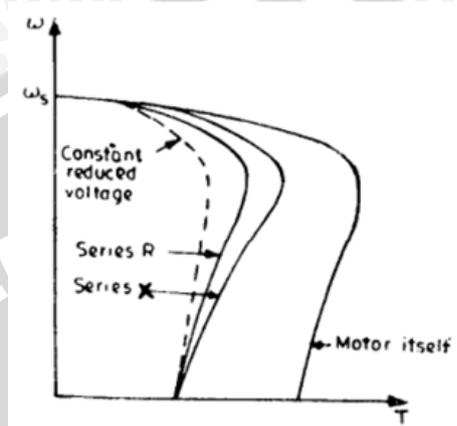


Gambar 2.13 Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (V_t/f diubah)

Sumber : SK. Pillai (1989 : 71)

2.7.3 Mengatur impedansi stator

Dengan memberikan resistor atau induktor pada stator, maka tegangan pada terminal stator akan turun. Dengan kondisi ini, maka besar tegangan terminal stator menjadi sebuah fungsi dari arus motor dan nilai tegangan akan berubah saat motor berakselerasi. Karakteristik torsi terhadap kecepatan sudut motor dengan mengatur resistor atau induktor pada sisi stator digambarkan pada gambar berikut.



Gambar 2.14 Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (Z diubah)

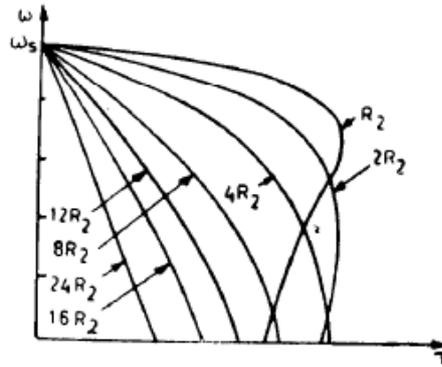
Sumber : SK. Pillai (1989 : 80)

Karena pada saat motor berakselerasi arus akan berubah, maka tegangan terminal stator akan berubah dikarenakan ada jatuh tegangan pada R atau X sebagai fungsi arus. Dengan adanya R atau X, maka akan didapatkan torsi lebih besar daripada torsi yang dihasilkan dengan menurunkan tegangan terminal secara konstan.

Dengan menggunakan resistor, maka faktor daya dari motor akan naik, namun mengakibatkan rugi-rugi starting yang lumayan tinggi. Dengan menggunakan induktor, rugi-rugi pada starting akan kecil, namun faktor daya akan turun.

2.7.4 Mengatur resistansi rotor

Pengendalian motor induksi dengan metode ini dibutuhkan motor induksi dengan rotor belitan. Resistor yang diberikan pada rotor belitan tersebut harus 3 buah resistor yang seimbang. Semakin besar nilai resistansi maka torsi akan turun.



Gambar 2.15 Karakteristik Torsi terhadap Kecepatan Sudut (R diubah)

Sumber : SK. Pillai (1989:73)

Dari keempat metode yang telah dijelaskan diatas maka metode pengaturan frekuensi dan tegangan sumber adalah yang paling bagus, karena efisiensi motor tidak terlalu jatuh pada putaran dibawah nominal.

2.8 Pengertian sistem perpompaan

Sistem pompa memiliki dua kegunaan utama :

1. Memindahkan cairan dari satu tempat ke tempat lainnya (misalnya air dari sumber bawah tanah ke tangki penyimpan air)
2. Mensirkulasikan cairan sekitar sistem (misalnya air pendingin atau pelumas yang melewati mesin-mesin dan peralatan)

Komponen utama sistem pemompaan adalah :

1. Pompa.
2. Mesin penggerak : motor listrik, mesin diesel atau sistem udara.
3. Perpipaan, digunakan untuk membawa fluida.
4. *Valve*, digunakan untuk mengendalikan aliran dalam sistem.



Gambar 2.16 Sistem Perpompaan di Industri

Sumber : Ria Prasetyo (2013:12)

2.9 Jenis-jenis pompa

Pada prinsipnya, perpindahan cairan apapun dapat ditangani oleh berbagai rancangan pompa. Pompa hadir dalam berbagai ukuran dan jenis untuk penggunaan yang luas, maka jenis-jenis pompa dapat dibagi menurut prinsip operasinya:

2.9.1 Pompa perpindahan positif

Pompa perpindahan positif dikenal dengan caranya beroperasi, cairan diambil dari salah satu ujung dan pada ujung lainnya dialirkan secara positif untuk setiap putarannya. Pompa perpindahan positif digunakan secara luas untuk pemompaan fluida selain air, biasanya fluida kental. Pompa perpindahan positif selanjutnya digolongkan berdasarkan cara perpindahannya:

1. Pompa *Reciprocating*, jika perpindahan dilakukan oleh maju mundurnya jarum piston. Pompa *reciprocating* hanya digunakan untuk pemompaan cairan kental dan sumur minyak.
2. Pompa *Rotary*, jika perpindahan dilakukan oleh gaya putaran sebuah *gear*, *cam* atau *impeller* dalam sebuah ruangan bersekat pada *casing* yang tetap. Pompa *rotary* selanjutnya digolongkan sebagai *gear* dalam, *gear* luar, *lobe*, *impeller* dorong dan lain-lain. Pompa – pompa tersebut digunakan untuk layanan khusus dengan kondisi khusus yang ada di lokasi industri.

2.9.2 Pompa dinamik

Pompa dinamik juga dikarakteristikan oleh cara pompa tersebut beroperasi, *impeller* yang berputar mengubah energi kinetik menjadi tekanan atau kecepatan yang diperlukan untuk memompa fluida. Terdapat dua jenis pompa dinamik:

1. Pompa sentrifugal merupakan pompa yang sangat umum digunakan untuk pemompaan air dalam berbagai penggunaan industri. Biasanya lebih dari 70% pompa yang dipasang di sebuah industri adalah pompa sentrifugal.
2. Pompa dengan efek khusus terutama digunakan untuk kondisi khusus di lokasi industri.

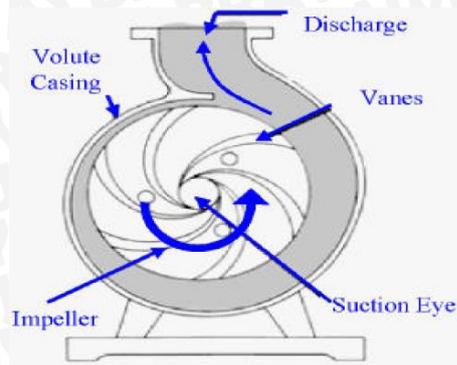
2.10 Pompa sentrifugal

Pompa sentrifugal merupakan salah satu peralatan yang paling sederhana dalam berbagai proses pabrik. Pompa digerakkan oleh motor, daya dari motor diberikan kepada poros pompa untuk memutar *impeller* yang dipasangkan pada poros.

2.10.1 Prinsip kerja pompa sentrifugal

Zat cair yang ada dalam *impeller* akan ikut berputar karena dorongan sud- sudu. Bilah – bilah *impeller* meneruskan energi kinetik ke cairan, sehingga menyebabkan cairan berputar. Karena timbulnya gaya sentrifugal, maka zat cair mengalir dari tengah *impeller* keluar melalui saluran diantara sudu dan meninggalkan *impeller* dengan kecepatan yang tinggi.

Zat cair yang keluar dari *impeller* dengan kecepatan tinggi ini kemudian mengalir melalui saluran yang penampangnya makin membesar (*volute/diffuser*), sehingga terjadi perubahan dari *head* kecepatan menjadi *head* tekanan. Maka zat cair yang keluar dari flens keluar pompa *head* totalnya bertambah besar. Penghisapan terjadi karena setelah zat cair dilemparkan oleh *impeller*, ruang diantara sudu – sudu menjadi vakum sehingga zat cair akan terhisap masuk. Gambar berikut memperlihatkan bagaimana pompa jenis ini beroperasi.



Gambar 2.17 Lintasan Aliran Pompa Sentrifugal

Sumber : Ria Prasetyo (2013:18)

2.10.2 Komponen pompa sentrifugal

Komponen utama dari pompa sentrifugal terlihat pada gambar berikut dan diterangkan dibawah ini:

1. Komponen berputar : *impeller* yang disambungkan ke sebuah poros (batang torak)
2. Komponen statis : wadah (*casing*)

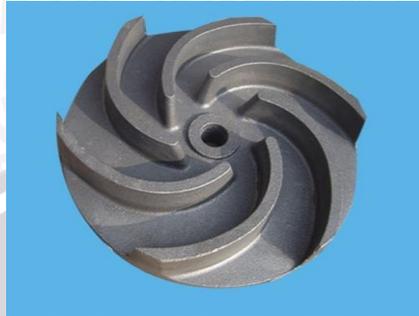


Gambar 2.18 Pompa Sentrifugal dan Komponennya

Sumber : Ria Prasetyo (2013:19)

a. *Impeller*

Impeller merupakan cakram bulat dari logam dengan lintasan untuk aliran fluida yang sudah terpasang. *Impeller* biasanya terbuat dari perunggu, polikarbonat, besi tuang atau *stainless steel*, namun bahan – bahan lain juga digunakan.



Gambar 2.19 *Impeller*

Sumber: <http://i00.i.aliimg.com/>

b. Batang torak

Batang torak memindahkan torsi dari motor ke *impeller* selama *startup* dan operasi pompa. Menurut letak porosnya, pompa dapat dibedakan menjadi poros horisontal dan poros vertikal seperti pada gambar berikut ini :

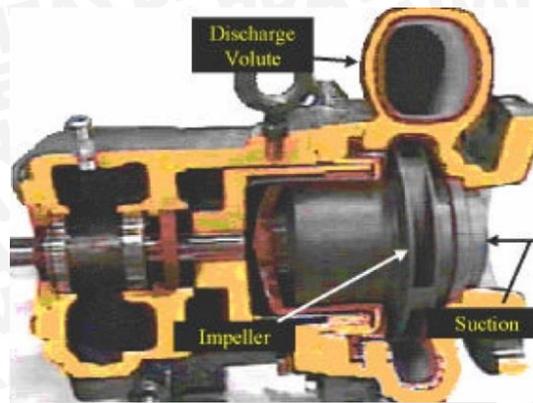


Gambar 2.20 Batang Torak: (a) Poros Vertikal (b) Poros Horizontal

Sumber: <http://i00.i.aliimg.com/>

c. Wadah (*casing*)

Fungsi utama wadah adalah menutup *impeller* pada penghisapan dan pengiriman pada ujung dan sehingga berbentuk tangki tekanan. Fungsi wadah yang kedua adalah memberikan media pendukung dan bantalan poros untuk batang torak dan *impeller*.



Gambar 2.21 Penampang pompa Sentrifugal dengan Wadah *Volute*

Sumber: <http://i00.i.aliimg.com/>

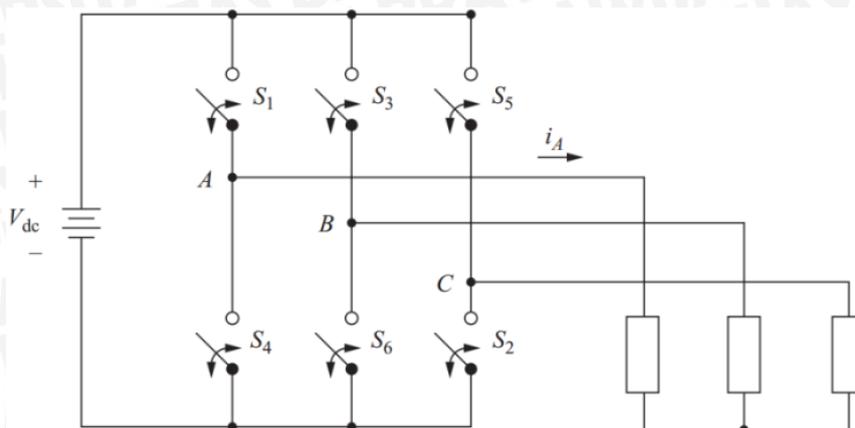
2.11 *Inverter 3 fasa*

Inverter 3 fasa merupakan rangkaian elektronik untuk merubah sumber tegangan DC menjadi AC 3 fasa. Rangkaian *inverter* menggunakan *Full-Bridge Inverter* dimana komponennya terdiri dari beberapa transistor untuk menghasilkan arus bolak balik.

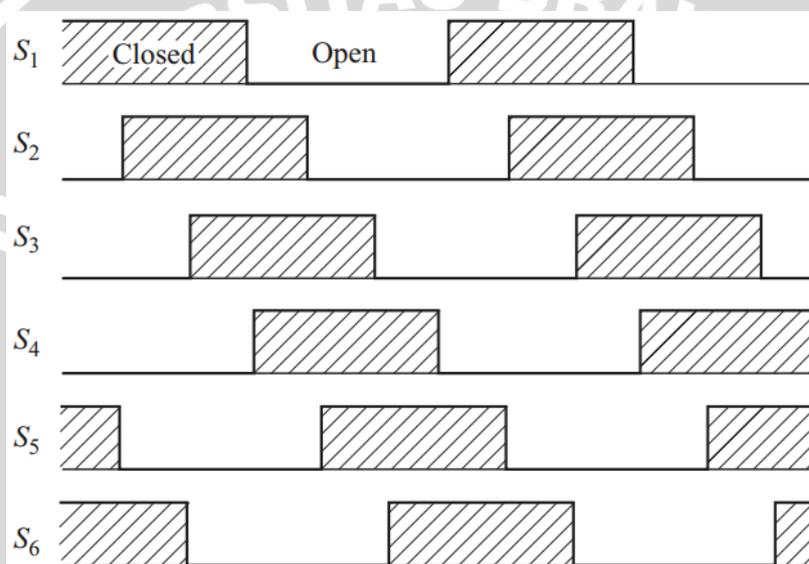
2.11.1 *Six step inverter*

Rasio tiap saklar memiliki *duty cycle* 50 %, dan interval pensaklaran $1/6 T$ atau interval sudut 60° derajat. Pensaklaran pada S_1 dan S_4 selalu berlawanan. Jika S_1 ditutup maka S_4 dibuka. Hal ini juga berlaku berlawanan untuk S_2 dengan S_5 dan S_3 dengan S_6 . Urutan pensaklaran yang salah bisa menyebabkan rangkaian *inverter* terjadi hubung singkat. (Daniel W. Hayt, 2010). Urutan pensaklaran menghasilkan tegangan keluaran tiga fasa seperti pada gambar 2.23.

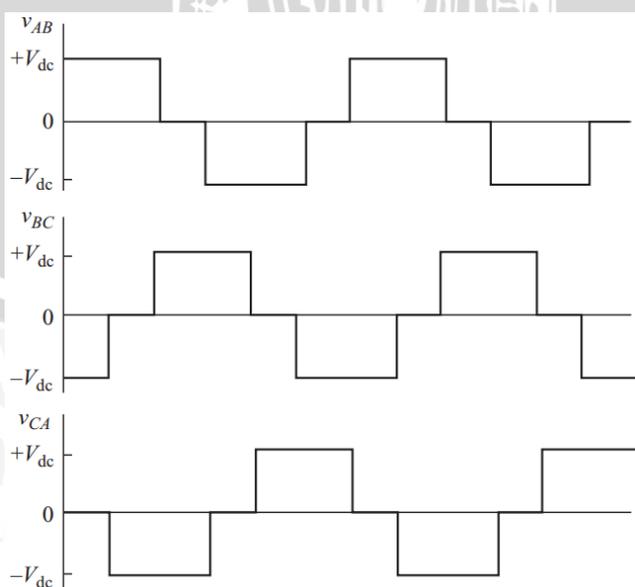
Deret fourier untuk tegangan keluaran mempunyai frekuensi dasar terhadap frekuensi pensaklaran. Frekuensi harmonik terjadi dari urutan $6k \pm 1$ dengan $k=1, 2, \dots$ ($n = 5, 7, 11, 13 \dots$). Harmonik ke 3 dan kelipatannya tidak ada dan harmonik genap juga tidak ada.



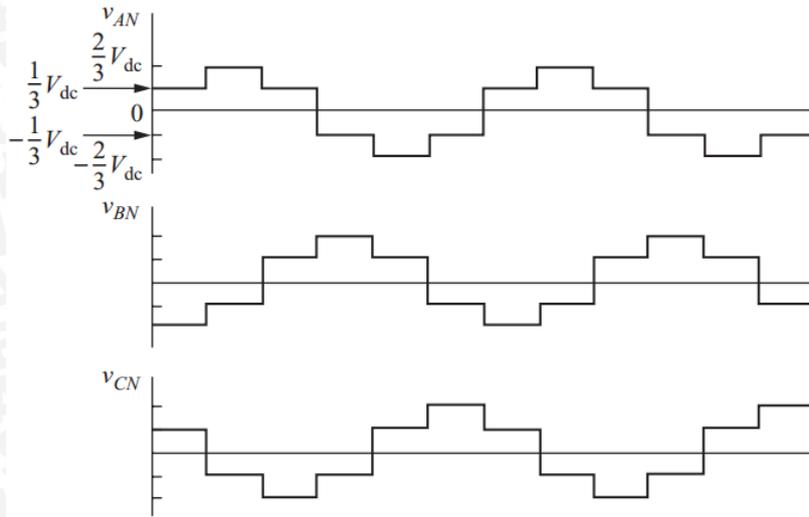
Gambar 2.22 Rangkaian *Inverter* Tiga Fasa



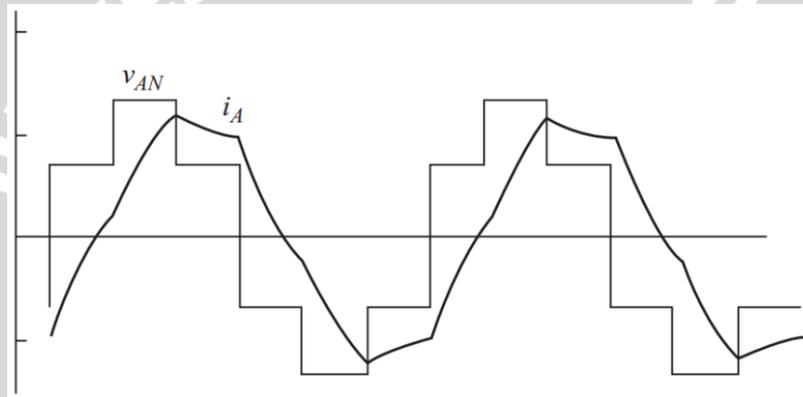
Gambar 2.23 Urutan Pensaklaran Metode *Six-Step Pulse*



Gambar 2.24 Tegangan keluaran *line to line*



Gambar 2.25 Tegangan Keluaran *Line to Netral* untuk Konfigurasi Beban Y



Gambar 2.26 Arus Fasa A untuk Beban RL

Sumber : Daniel W. Hayt (2010 : 374 – 375)

Dari input tegangan DC, keluaran untuk beban hubungan Y dirumuskan dari koefisien fourier berikut:

$$V_{n, L-L} = \left| \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos\left(n\frac{\pi}{6}\right) \right| \quad (2-24)$$

$$V_{n, L-N} = \left| \frac{2V_{dc}}{3n\pi} \left[2 + \cos\left(n\frac{\pi}{3}\right) - \cos\left(n\frac{2\pi}{3}\right) \right] \right| \quad n = 1, 5, 7, 11, 13, \dots \quad (2-25)$$

$$I_{n, L-L} = \frac{V_{n, L-L}}{Z_n} \quad (2-26)$$

$$I_{n, L-N} = \frac{V_{n, L-N}}{Z_n} \quad (2-27)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{n,rms})^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} \quad (2-28)$$

Total Harmonic Distortion (THD) arus dapat dihitung dengan mensubstitusikan arus dengan tegangan dari persamaan diatas. THD arus pada fasa A untuk konfigurasi *wye* beban RL dapat dilihat pada gambar 2.26. Frekuensi keluaran dapat diatur dengan mengubah frekuensi pensaklaran. Besar tegangan keluaran bergantung dari nilai sumber tegangan DC.

2.11.2 PWM Inverter

Pensaklaran *Pulse Width Modulation* untuk 3 fasa memiliki kelebihan seperti 1 fasa, yaitu mengurangi total harmonisa dan amplitudo yang dapat dikontrol oleh frekuensi. Untuk sistem pensaklaran 3 fasa ini hampir mirip dengan 1 fasa. Yaitu untuk membandingkan gelombang referensi sinusoida dengan gelombang *carrier* segitiga. Dengan frekuensi yang sama dan amplitudo yang mengikuti dari gelombang *carrier*. (Daniel W. Hayt, 2010)

Untuk rangkaiannya sendiri sama seperti *six step inverter*. yang setiap *inverternya* dikontrol secara berpasangan, (S1, S4), (S2, S5), dan (S3, S6) yang bisa dilihat pada gambar 2.22.

Ketika 1 pasang *inverternya* ON maka yang lainnya OFF. Setiap pasang *inverter* membutuhkan gelombang sinus yang berbeda 120° untuk membuat keluaran 3 fasa yang seimbang.

Kontrol saklar:

Vtri : gelombang segitiga

S1 ON ketika $V_a > V_{tri}$

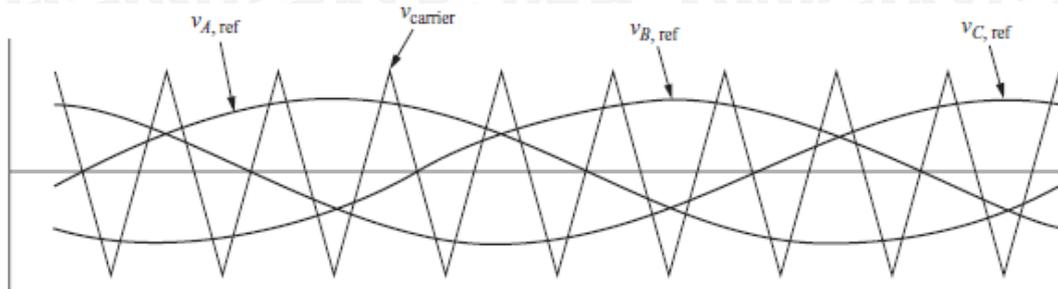
S4 ON ketika $V_a < V_{tri}$

S2 ON ketika $V_c > V_{tri}$

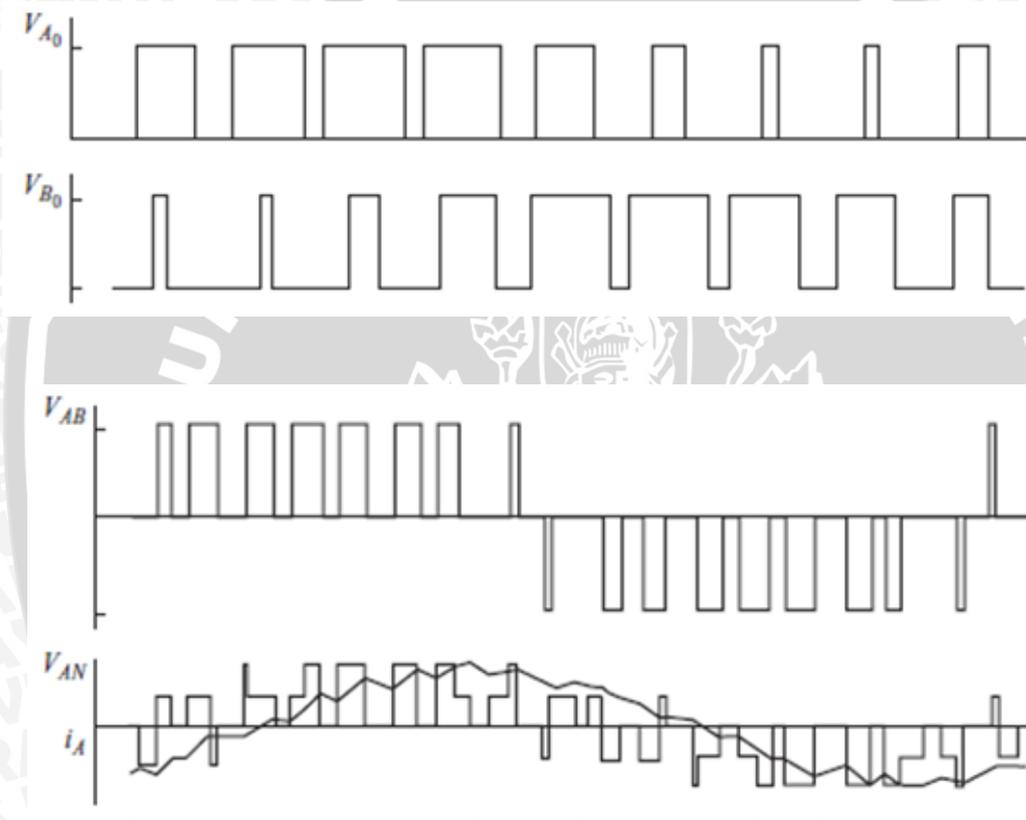
S5 ON ketika $V_c < V_{tri}$

S3 ON ketika $V_b > V_{tri}$

S6 ON ketika $V_b < V_{tri}$



Gambar 2.27 Gelombang *Carrier* dan Referensi dari PWM 3 fasa



Gambar 2.28 Keluaran Tegangan Line to Line dari PWM 3 Fasa

Sumber : Daniel W. Hayt (2010 : 377)

Harmonisa pun akan kecil apabila frekuensi *carrier* dipilih angka ganjil yang besarnya 3 kali lipat dari frekuensi dasar. Seperti 3, 9, 15 dst.

Maka :

$$V_{n3} = \sqrt{A_{n3}^2 + B_{n3}^2} \tag{2-29}$$

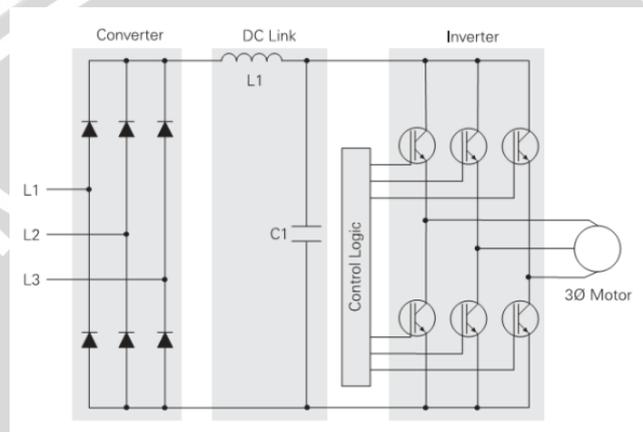
Dimana :

$$A_{n3} = V_n \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \tag{2-30}$$

$$B_{n3} = V_n \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad (2-31)$$

2.12 Variable Speed Drive

Variable Speed Drive merupakan sebuah alat pengendali putaran motor dengan mengubah nilai frekuensi dan tegangan yang masuk ke motor. Pengaturan nilai frekuensi dan tegangan ini dimaksudkan untuk mendapatkan putaran dan torsi motor yang diinginkan.



Gambar 2.29 Rangkaian *Variable Speed Drive*

Sumber: <http://taufiqsabirin.com>

Variable Speed Drive terdiri dari 3 bagian yaitu *converter*, DC bus dan *inverter*. *Converter* berfungsi untuk menyearahkan tegangan AC menjadi tegangan DC. Setelah tegangan sudah disearahkan menjadi tegangan DC maka diperlukan perbaikan kualitas tegangan DC dengan menggunakan *filter* kapasitor sebagai perata tegangan. Kemudian tegangan DC diubah menjadi tegangan AC yang tegangan dan frekuensinya bervariasi oleh *inverter* dengan teknik PWM (*Pulse Width Modulation*) (P.C.SEN, 1997).

Untuk menghasilkan tegangan yang bervariasi dilakukan dengan cara mengatur *dutycycle* sedangkan untuk menghasilkan frekuensi yang bervariasi dilakukan dengan cara mengatur periode waktu penyaklaran yaitu mengatur lebar dan sempitnya gelombang referensi (V_a, V_b, V_c) yang dapat dilihat pada gambar 2.27 dan 2.28.

Dengan teknik PWM ini bisa didapatkan amplitudo dan frekuensi keluaran yang diinginkan. Selain itu teknik PWM juga menghasilkan harmonisa yang jauh lebih kecil dari pada teknik yang lain serta menghasilkan gelombang sinusoidal yang lebih sempurna, dimana harmonisa ini akan menimbulkan rugi-rugi pada motor

yaitu ,menyebabkan cepat panas. Maka dari itu teknik PWM inilah yang biasanya dipakai dalam mengubah tegangan DC menjadi AC (*Inverter*).

Banyak cara untuk mengatur atau mengurangi kecepatan motor seperti dengan pengaturan *gear box*. Namun mengatur kecepatan motor dengan *Variable Speed Drive* akan memperoleh banyak keuntungan yang lebih bila dibandingkan dengan cara-cara yang lain. Seperti: jangkauan yang luas untuk pengaturan kecepatan dan torsi motor, mempunyai *acceleration* dan *deceleration* yang dapat diatur, mempermudah proses monitoring atau pengecekan, sistem proteksi motor yang baik, mengurangi arus starting motor dan menghemat pemakaian energi listrik, memperhalus start awal motor.

Terdapat banyak produk *Variable Speed Drive* di pasaran dengan berbagai merek, seperti : Mitsubishi, Altivar, Siemens, LG, Omron, Hitachi, Yaskawa, Fuji, dll.



Gambar 2.30 Macam-macam *Variable Speed Drive*

Sumber: <http://trikueni-desain-sistem.blogspot.com/>

Pemilihan *Variable Speed Drive* yang benar tentunya dengan memperhatikan spesifikasi dari motor serta keperluan dalam pemakaian *Variable Speed Drive* itu sendiri. Seperti dengan memperhatikan daya, tegangan, frekuensi motor. Contohnya ketika memiliki motor 3 fasa 3 kW, maka diperlukan *Variable Speed Drive* dengan spesifikasi daya diatas 3 kW. Menggunakan *Variable Speed Drive* dengan daya 3 kW untuk motor 3 kW juga diperbolehkan tapi dengan syarat motor tersebut hanya dibebani dengan beban yang kecil. Jadi penting untuk mengetahui arus pada motor saat dijalankan dengan beban, untuk settingan ampere pada *Variable Speed Drive* sebagai proteksi motor, serta untuk menghitung daya beban yang berguna dalam pemilihan *Variable Speed Drive*.

2.13 *Water flow meter*

Water flow meter adalah alat untuk mengukur jumlah atau laju aliran dari suatu fluida yang mengalir dalam pipa atau sambungan terbuka. *Water flow meter* umumnya terdiri dari dua bagian, yaitu alat utama dan alat bantu sekunder. Alat utama menghasilkan suatu signal yang merespons terhadap aliran karena laju aliran tersebut telah terganggu. Alat utamanya merupakan sebuah *pinwheel* atau sebuah roda yang nantinya akan berputar bila di aliri oleh air. Alat bantu sekunder menerima sinyal dari alat utama lalu menampilkan dan merekam laju aliran yang biasanya berupa *hall effect magnetic sensor* yang fungsinya untuk mengukur berapa kali *pinwheel* tersebut telah berputar, dan mentransmisikannya sebagai hasil pengukuran dari debit air.



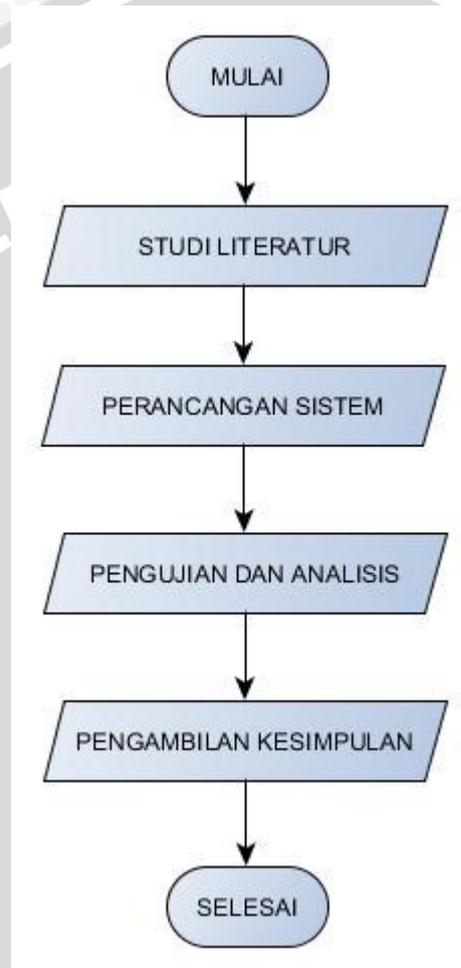
Gambar 2.31 *Water Flow Meter*

Sumber: <http://sfe-electronics.com/>

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Kajian yang dilakukan dalam skripsi adalah membuat dua sistem untuk membandingkan konsumsi energi listrik sistem pompa air dengan cara mengatur jumlah debit air menggunakan *Altivar-312* dan *Valve*. Metode yang digunakan untuk merealisasikan sistem tersebut seperti pada diagram alir dibawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

3.1 Studi literatur

Studi literatur bertujuan untuk memahami pengetahuan tentang konsep dan segala sesuatu yang dibutuhkan untuk melakukan penelitian ini. Studi literatur dilakukan dengan cara mencari referensi dari buku maupun artikel dari internet agar mengetahui prinsip kerja, karakteristik komponen, serta teori yang menunjang dalam penelitian ini.

3.2 Perancangan Sistem

Berisi rancangan sebuah sistem yang diwakilkan oleh sebuah diagram balok dan spesifikasi setiap alat yang diperlukan dalam perancangan sistem ini. Spesifikasi diperoleh dari pengujian setiap alat. Perancangan sistem dalam penelitian ini dengan cara menggabungkan dan merealisasikan dari masing-masing diagram balok sistem yang telah dirancang sebelumnya.

3.3 Pengujian dan Analisis

Pengujian dan analisis berisi serangkaian data yang telah di dapatkan dari pengujian kedua sistem, kemudian akan di analisis perbandingan data dari kedua kedua sistem dan melakukan perhitungan yang membedakan karakteristik dari kedua sistem tersebut.

3.4 Pengambilan Kesimpulan

Kesimpulan diambil berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian sistem secara keseluruhan. Jika hasil yang didapatkan telah sesuai dengan yang direncanakan sebelumnya, maka sistem tersebut telah berhasil memenuhi harapan dan tentunya memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk penyempurnaan.

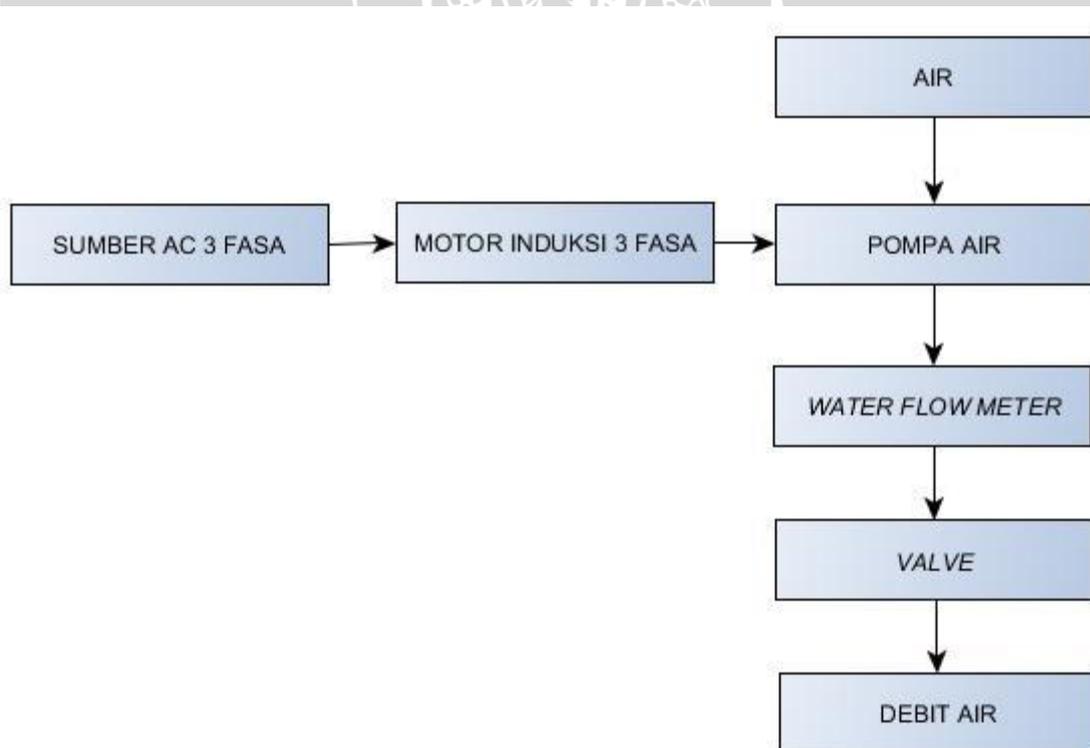
BAB IV PERANCANGAN SISTEM

Konsep dari penelitian ini adalah membandingkan konsumsi energi listrik pompa air dari kedua sistem yaitu sistem pompa air yang menggunakan *Altivar-312* dan *Valve*. Sebelum merancang sebuah sistem yang akan dilakukan pada penelitian ini, ada baiknya melakukan tahapan-tahapan sebagai berikut:

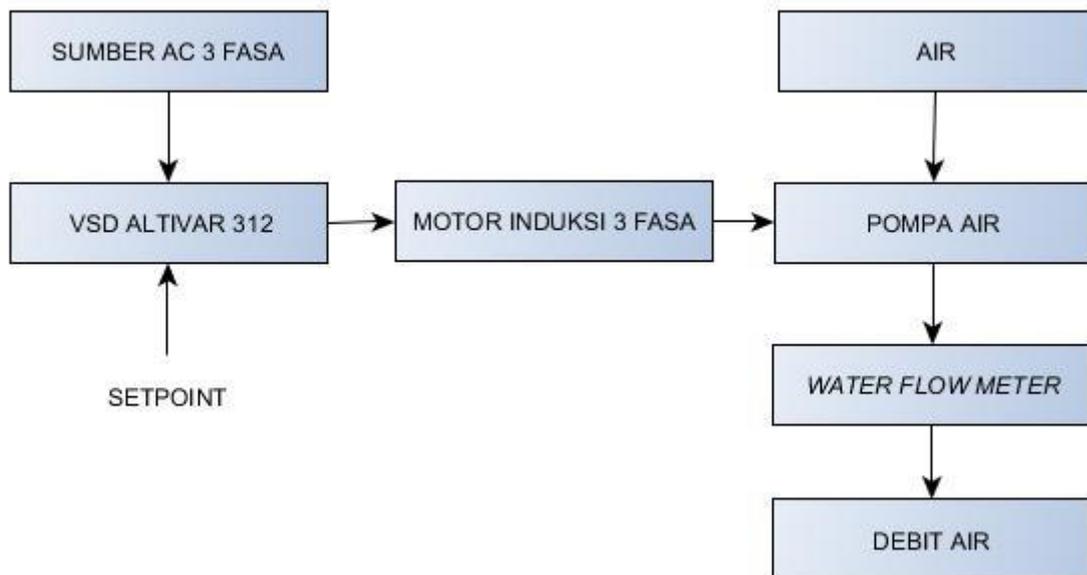
1. Perancangan diagram balok sistem secara keseluruhan.
2. Penentuan spesifikasi setiap balok..

4.1 Perancangan diagram balok sistem secara keseluruhan

Diagram balok merupakan penggambaran suatu sistem dalam bentuk balok, setiap balok mewakili elemen sistem yang memiliki fungsi tertentu. Diagram balok dapat memudahkan dalam menganalisa dan merancang sistem yang akan dibuat. Berikut diagram balok dari perancangan sistem pompa air dari kedua sistem



Gambar 4.1 Diagram Balok Sistem Pompa Air *Valve*



Gambar 4.2 Diagram Balok Sistem Pompa Air *Altivar-312*

4.2 Penentuan spesifikasi setiap balok

Setelah perancangan diagram balok sistem secara keseluruhan, maka penentuan spesifikasi dari setiap alat yang diwakilkan dari setiap balok juga harus dilakukan agar sistem dapat bekerja dengan baik. Contohnya, motor mempunyai spesifikasi tegangan 380V, 1,1A, maka *Variable Speed Drive* harus mampu menangani tegangan dan arus dengan sebesar itu. Penentuan spesifikasi dari setiap alat dapat diperoleh dengan cara pengujian alat atau *datasheet* alat yang langsung dari pabrik.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. *Variable Speed Drive Altivar-312* tipe ATV312HU11N4.
2. Motor induksi 3 fasa LEYBOLD-DIDACTIC GMBH yang dengan pompa air SHIMIZU PN-125 BIT.
3. *Water Flow Meter* Adafruit.

4.2.1 Spesifikasi *Variable Speed Drive*

Variable Speed Drive adalah suatu alat yang berfungsi sebagai pengendali kecepatan putaran dan torsi motor sesuai yang kita inginkan. Secara sederhana prinsipnya sama seperti dengan inverter yaitu dengan cara merubah tegangan dan frekuensi masukan dari motor tersebut.



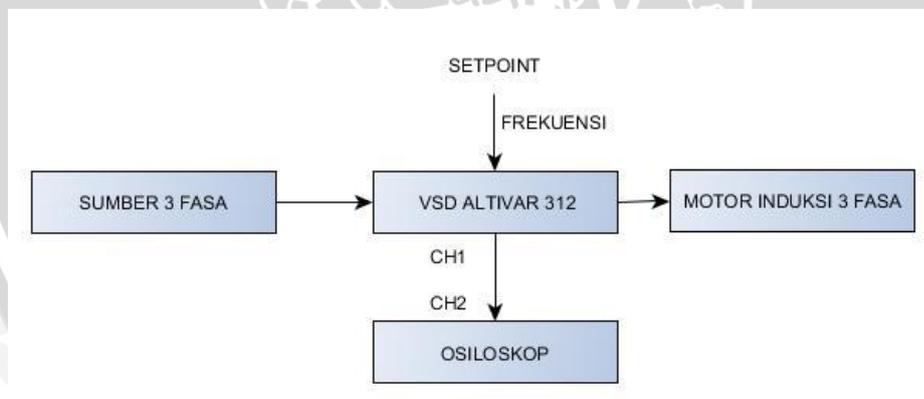
Altivar 312 (ATV312HU11N4)

V_{in}	= 380 – 500 VAC (3 Φ)
F	= 50/60 Hz
P_{Motor}	= 1.1kW <u>atau</u> 1.5 HP
I_{in} saat 380 V	= 4.9 A
I_{in} saat 500 V	= 3.7 A
S_{in}	= 3.2 kVA
I_{max} <i>inrush</i>	= 10 A
Disipasi daya arus nominal	= 48 W
I_{out} <u>nominal</u>	= 3.0 A
I_{out} <u>transien</u> maksimum	= 4.5 A

Gambar 4.3 Spesifikasi Schneider *Altivar-312* tipe ATV312HU11N4

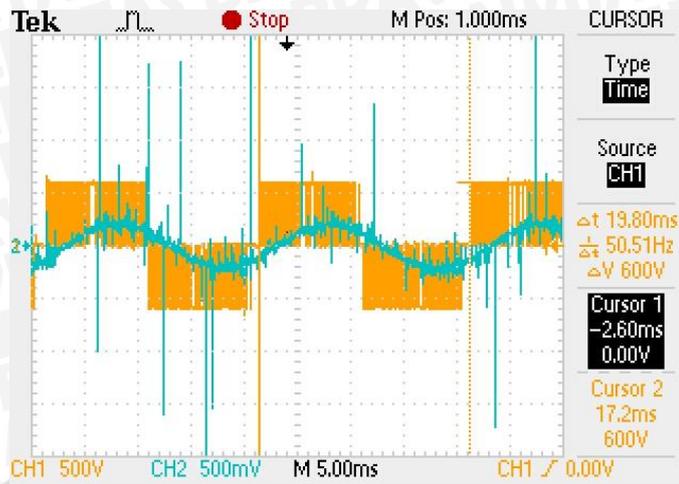
Sumber: www.schneider-electric.com/

Pada penelitian ini *Variable Speed Drive* yang penulis gunakan adalah Schneider Altivar 312 tipe ATV312HU11N4 dengan daya max motor 1.1 kW dan 1.5 HP. Selain spesifikasi diperlukan juga sebuah pengujian. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui topologi pensaklaran apa yang digunakan pada *Altivar-312*. Berikut adalah diagram balok pengujian *Altivar-312*:

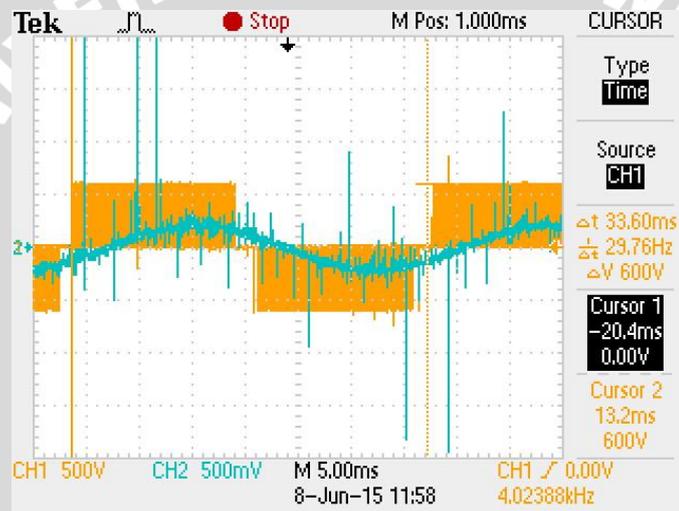


Gambar 4.4 Diagram Balok Pengujian *Altivar-312*

Kemudian setelah pengujian *Altivar 312* melalui osiloskop diperoleh hasil gelombang seperti di gambar 4.4 dan gambar 4.5. Dimana masukan CH1 adalah tegangan dan masukan CH2 adalah arus.



Gambar 4.5 Gelombang *Altivar-312* pada Frekuensi 50.51 Hz

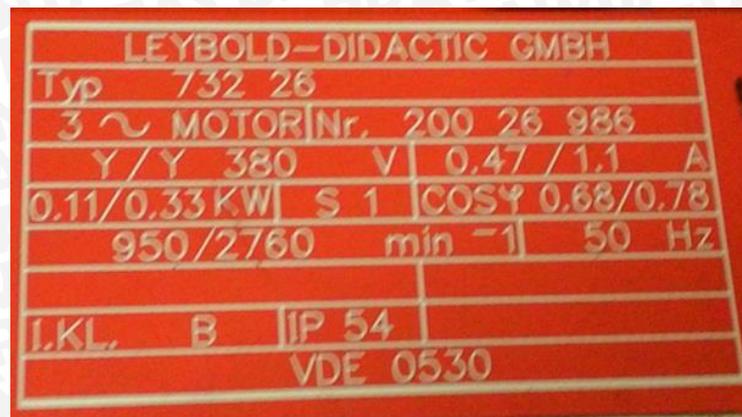


Gambar 4.6 Gelombang *Altivar-312* pada Frekuensi 29.76 Hz

Dari gambar hasil pengujian gelombang *Altivar-312* dapat disimpulkan bahwa menggunakan topologi PWM (*Pulse Width Modulation*). Dengan topologi ini bisa didapatkan amplitudo dan frekuensi keluaran yang diinginkan. Selain itu topologi ini juga menghasilkan harmonisa yang lebih kecil, yang diketahui bahwa efek dari harmonisa itu tersendiri membuat motor mudah panas.

4.2.2 Spesifikasi motor induksi 3 fasa

Motor yang dioperasikan sebagai penggerak pompa air pada penelitian kali ini adalah LEYBOLD-DIDACTIC GMBH yaitu motor induksi 3 fasa dengan spesifikasi seperti gambar 4.3 berikut :



Gambar 4.7 Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

Variable Speed Drive yang digunakan pada penelitian ini memiliki pengaturan arus masukan minimum dari motor sebesar 0.7 A maka penulis memakai spesifikasi motor induksi sebagai berikut:

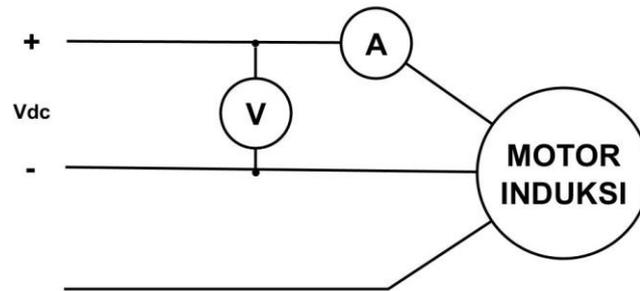
V_{in}	=	380 V
I_{in}	=	1.1 A
P_{in}	=	0.33 kW
Hubungan	=	Y / bintang
$\cos \varphi$	=	0.78
n_r	=	2760 rpm
F	=	50 Hz

Untuk Parameter motor induksi 3 fasa tersendiri dilakukan 3 tahap pengujian, yaitu:

1. Pengujian DC (*DC test*).
2. Pengujian rotor ditahan (*Blocked rotor test*).
3. Pengujian tanpa beban (*No load test*).

1. Pengujian DC (*DC Test*)

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan parameter R_1 , rangkaian pengujiannya sebagai berikut:



Gambar 4.8 Rangkaian Pengujian DC (*DC test*)

Dari hasil pengukuran diperoleh data sebagai berikut:

$$V_{DC} = 12 \text{ V}$$

$$I_{DC} = 0,19 \text{ A}$$

$$R_1 = 62,5 \Omega$$

Dimana :

$$R_1 = \text{resistansi stator}$$

$$V_{DC} = \text{tegangan searah}$$

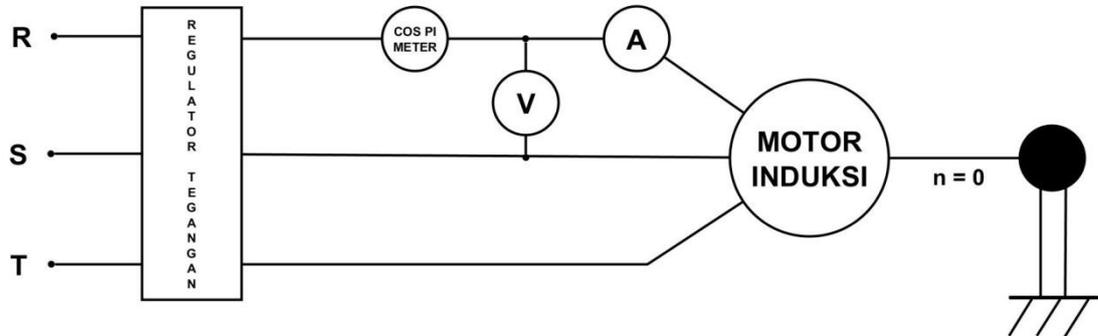
$$I_{DC} = \text{arus searah}$$

Belitan stator mesin induksi terhubung Y atau bintang, sehingga arus dc mengalir melalui dua belitan stator. Resistansi stator setiap fasa adalah:

$$\begin{aligned} R_1 / \text{fasa} &= \frac{62,5}{2} \\ &= 31,25 \Omega \end{aligned}$$

2. Pengujian rotor ditahan (*blocked rotor test*)

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan parameter R'_2, X_1, X'_2 . Rangkaian pengujiannya sebagai berikut :



Gambar 4.9 Rangkaian Pengujian Rotor ditahan (*Blocked Rotor Test*)

Dari hasil pengukuran rangkaian pengujian dan perhitungan terhadap persamaan berikut:

$$P_{in} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \varphi$$

Maka didapatkan hasil data:

$$V_{BR} = 125 \text{ V}$$

$$I_{BR} = 1,10 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = 0,5$$

$$P_{BR} = 119,07 \text{ W}$$

Dimana:

$$V_{BR} = \text{Tegangan saat rotor ditahan}$$

$$I_{BR} = \text{Arus saat rotor ditahan}$$

$$P_{BR} = \text{Daya nyata masukan saat rotor ditahan}$$

Dari data tersebut maka dapat ditentukan besaran Z_{BR}, R_{BR}, X_{BR} :

$$\begin{aligned} Z_{BR} &= \frac{V_{BR}}{\sqrt{3} \times I_{BR}} \\ &= \frac{125}{\sqrt{3} \times 1,1} \end{aligned}$$

$$= 65,60 \Omega$$

$$\begin{aligned} R_{BR} &= \frac{P_{BR}}{3 \times I_{BR}^2} \\ &= \frac{119,07}{3 \times 1,1^2} \\ &= 32,80 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{BR} &= \sqrt{Z_{BR}^2 - R_{BR}^2} \\ &= \sqrt{65,60^2 - 32,80^2} \\ &= 56,81 \Omega \end{aligned}$$

Dimana:

Z_{BR} = impedansi saat rotor di blok

R_{BR} = resistansi saat rotor di blok

X_{BR} = reaktansi bocor saat motor di blok

Kemudian parameter X_1 dan X'_2 baru dapat ditentukan dengan cara melihat tabel perbandingan reaktansi bocor seperti gambar dibawah ini

PERBANDINGAN REAKTANSI BOCOR

	X_1 & X'_2 as function of X_{BR}	
Rotor Design	X_1	X'_2
Wound rotor	$0.5 X_{BR}$	$0.5 X_{BR}$
Design A	$0.5 X_{BR}$	$0.5 X_{BR}$
Design B	$0.4 X_{BR}$	$0.6 X_{BR}$
Design C	$0.3 X_{BR}$	$0.7 X_{BR}$
Design D	$0.5 X_{BR}$	$0.5 X_{BR}$

$$X_{BR} = X_1 + X'_2$$

Gambar 4.10 Perbandingan Reaktansi Bocor

Karena motor yang digunakan termasuk kelas B, maka:

$$\begin{aligned} X_1 &= 0,4 \times X_{BR} \\ &= 0,4 \times 56,81 \\ &= 22,72 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X'_2 &= 0,6 X_{BR} \\ &= 0,6 \times 56,81 \\ &= 34,08 \Omega \end{aligned}$$

Dimana:

X_1 = reaktansi bocor di stator (Ω)

X'_2 = reaktansi bocor di rotor (Ω)

Menentukan parameter R'_2 :

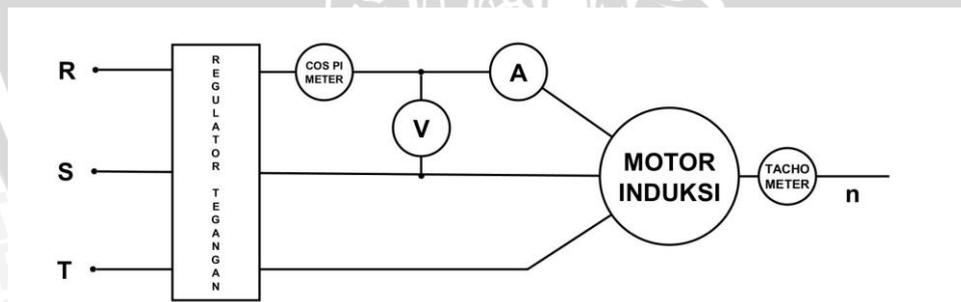
$$\begin{aligned} R_{BR} &= R_1 + R'_2 \\ R'_2 &= R_{BR} - R_1 \\ &= 32,80 - 31,25 \\ &= 1,55 \Omega \end{aligned}$$

Dimana:

R'_2 = resistansi rotor (Ω)

3. Pengujian motor tanpa beban (*no load test*)

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan parameter X_m . Rangkaian pengujiannya sebagai berikut:



Gambar 4.11 Rangkaian Pengujian Motor Induksi Tanpa Beban (*No Load Test*)

Melalui hasil pengukuran dan hasil perhitungan terhadap persamaan 4-1, maka didapatkan hasil data sebagai berikut:

Tabel 4.1 Pengujian Motor Induksi Tanpa Beban (*No Load Test*)

V_{TB} (V)	I_{TB} (A)	$\cos \phi_{TB}$	P_{TB} (W)	n_r (rpm)
0			4.69	
100	0.18	0.5	15.59	2860
150	0.18	0.3	14.03	2940
200	0.23	0.2	15.59	2965
250	0.31	0.2	26.85	2975
300	0.43	0.2	44.69	2985
350	0.65	0.2	78.81	2990
380	0.90	0.2	118.47	2990

Dimana:

V_{TB} = tegangan masukan saat tanpa beban

I_{TB} = arus masukan saat tanpa beban

$\cos \phi_{TB}$ = faktor daya saat tanpa beban

P_{TB} = daya nyata masukan saat tanpa beban

n_r = putaran rotor

Menentukan parameter X_m :

$$\begin{aligned} Z_{TB} &= \frac{V_{TB}}{\sqrt{3} \times I_{TB}} \\ &= \frac{380}{\sqrt{3} \times 0,9} \\ &= 243,77 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{TB} &= \frac{P_{TB}}{3 \times I_{TB}^2} \\ &= \frac{118,47}{3 \times 0,9^2} \\ &= 48,75 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{TB} &= \sqrt{Z_{TB}^2 - R_{TB}^2} \\ &= \sqrt{243,77^2 - 48,75^2} \\ &= 238,84 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_m &= X_{TB} - X_1 \\ &= 238,84 - 22,724 \\ &= 216,11 \Omega \end{aligned}$$

Dimana:

Z_{TB} = impedansi saat tanpa beban

R_{TB} = resistansi saat tanpa beban

X_{TB} = reaktansi saat tanpa beban

X_m = reaktansi magnetik

Apabila dituliskan secara matematis persamaan aliran daya motor induksi untuk keadaan tanpa beban :

$$P_{TB} = P_{core} + P_{SCL} + P_{f+w}$$

$$P_{core} + P_{f+w} = P_{in} - P_{SCL}$$

$$P_{SCL} = 3 I_{TB}^2 R_1$$

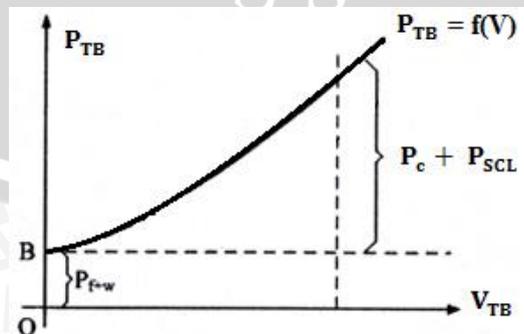
Dimana:

P_{core} = rugi inti besi (Watt)

P_{SCL} = rugi tembaga belitan stator (Watt)

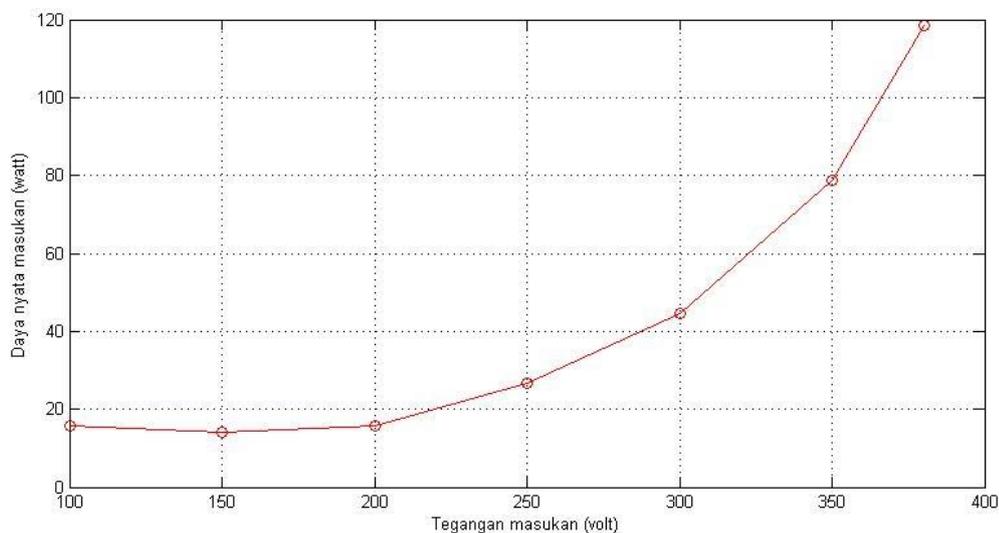
P_{f+w} = rugi gesek dan angin (Watt)

Untuk memisahkan P_{core} dan P_{f+w} dapat dilakukan dengan membuat lengkung daya sebagai fungsi tegangan keadaan tanpa beban.



Gambar 4.12 Lengkung Daya Sebagai Fungsi Tegangan

Rugi P_{f+w} dapat diambil sama dengan daya masuk pada tegangan minimum saat motor akan berputar, karena pada saat ini rugi inti dapat diabaikan maka rugi gesek dan angin $P_{f+w} = OB$



Gambar 4.13 Grafik Hubungan Tegangan Masukan Motor Induksi Tiga Fasa terhadap Daya Nyata Masukan

Untuk perhitungan P_{f+w} motor induksi dapat dilihat di lampiran 1

Dari grafik gambar 4.13 diperoleh rugi gesek dan angin P_{f+w} sebesar 4,69 W dan menunjukkan bahwa semakin besar tegangan semakin besar juga daya nyata masukan motor.

$$\begin{aligned} P_{SCL} &= 3 \times I_{in}^2 \times R_1 \\ &= 3 \times 0,9^2 \times 31,25 \\ &= 75,9375 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{core} &= P_{in} - P_{SCL} - P_{f+w} \\ &= 118,47 - 75,9375 - 4,6950 \\ &= 37,8375 \text{ W} \end{aligned}$$

4.2.3 Spesifikasi pompa air

Variable Speed Drive yang digunakan pada penelitian ini membutuhkan sistem listrik 3 fasa, karena pompa air yang digunakan hanya memiliki sistem 1 fasa maka pompa air ini akan dikopel oleh motor untuk menghisap dan mendorong air. Agar

pompa tersebut tidak menjadi beban elektrik maka rotor yang digunakan di pompa air tersebut harus dilepas maka spesifikasi mekanis pompa air pun akan berubah sehingga spesifikasi yang dapat dicantumkan antara lain:

Pompa Air Shimizu PN-125 bit

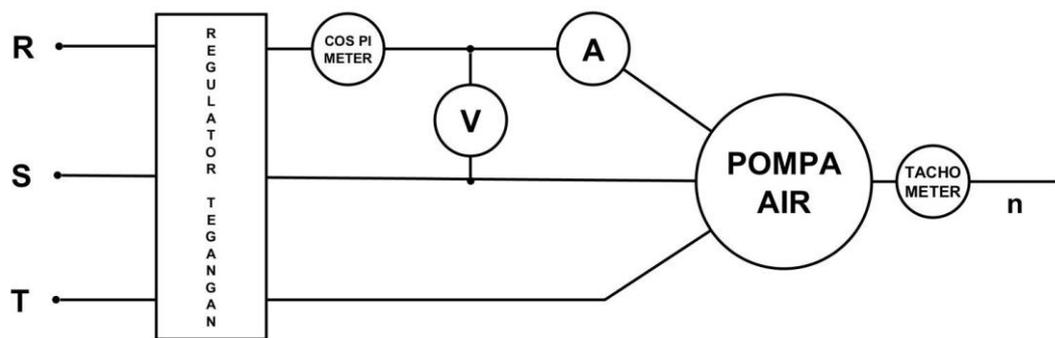


- Tipe pompa : sentrifugal
- Daya dorong max. : 33 m
- Pipa hisap 1 inch
- Pipa dorong : 1 inch

Gambar 4.14 Spesifikasi Pompa Air

Sumber: <http://www.shimizu.co.id/>

Untuk mencari rugi gesek dan angin P_{f+w} maka hal yang harus dilakukan adalah melakukan pengujian tanpa beban dimana pompa tersebut dioperasikan kembali seperti motor. maka rangkaian pengujiannya:

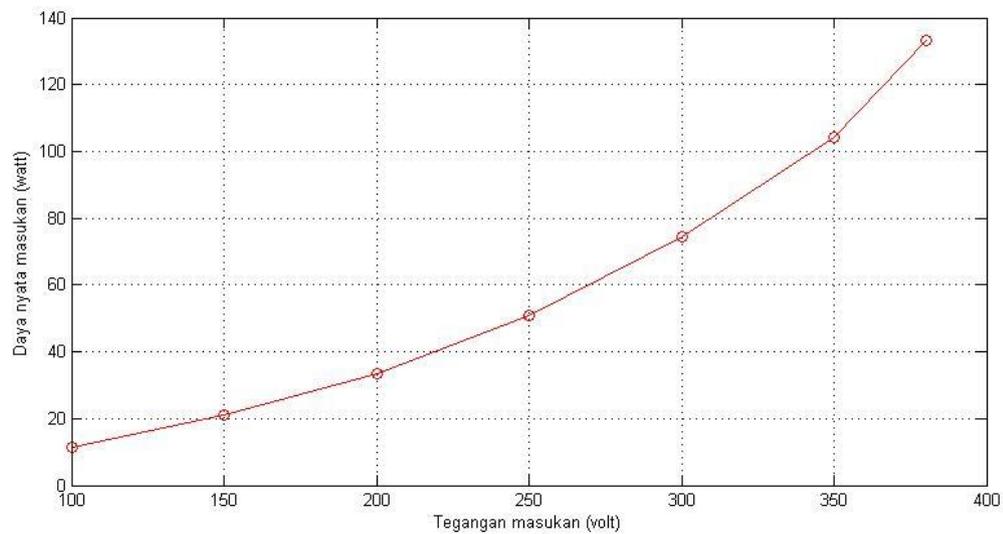


Gambar 4.15 Rangkaian Pengujian Pompa Air Tanpa Beban (*No Load Test*)

Melalui hasil pengukuran dan hasil perhitungan terhadap persamaan 4-1, maka didapatkan hasil data sebagai berikut:

Tabel 4.2 Pengujian Pompa Air Tanpa Beban (*No Load Test*)

V_{TB} (V)	I_{TB} (A)	$\cos \phi_{TB}$	P_{TB} (W)	n_r (rpm)
0			5.61	
100	0.74	0.55	11.51	2930
150	0.78	0.52	20.91	2940
200	0.81	0.52	33.32	2940
250	0.86	0.49	51.00	2945
300	0.90	0.47	74.56	2950
350	0.98	0.45	104.26	2950
380	1.00	0.45	133.28	2950



Gambar 4.16 Grafik Hubungan Tegangan Masukan Pompa Air terhadap Daya Nyata Masukan

Untuk memisahkan P_{core} dan P_{f+w} sama seperti motor induksi yaitu dengan cara membuat lengkung daya sebagai fungsi tegangan keadaan tanpa beban kemudian rugi P_{f+w} dapat diambil sama dengan daya masuk pada tegangan minimum saat motor akan berputar.

Untuk perhitungan P_{f+w} motor induksi dapat dilihat di lampiran 2

Dari grafik gambar 4.16 diperoleh rugi gesek dan angin P_{f+w} sebesar 5.61 W dan menunjukkan semakin besar tegangan semakin besar juga daya nyata masukan motor.

4.2.4 Spesifikasi *Water Flow Meter*

Setelah pompa air berputar sesuai *setpoint* (frekuensi yang diinginkan) yang kita masukkan. Langkah selanjutnya adalah membaca berapa debit air yang telah mengalir,

untuk meningkatkan akurasi dalam pembacaan debit air maka dari itu diperlukan sebuah *Water Flow Meter* di sistem ini.

RB-Ada-68

Adafruit Water Flow Meter (1/2")

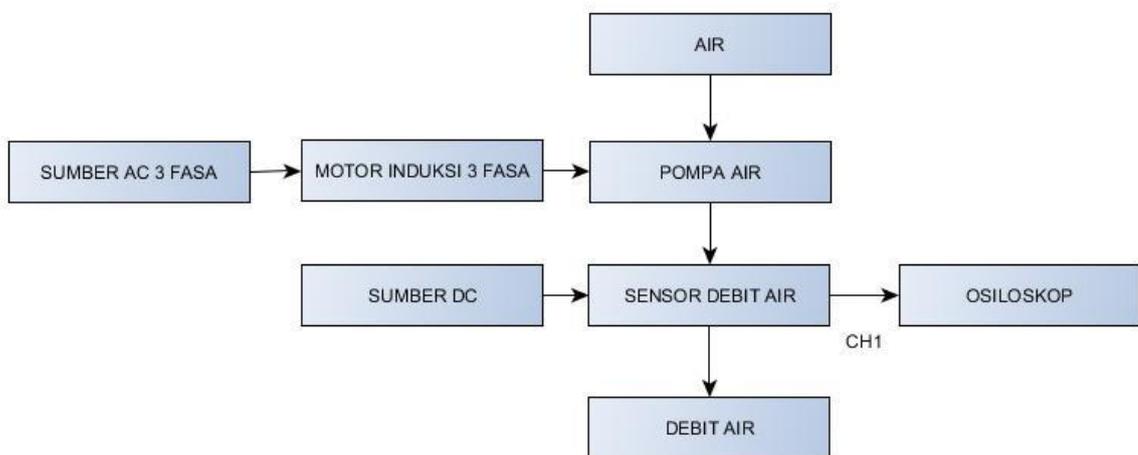


- Working Voltage: 5 to 18VDC
- Max current draw: 15mA @ 5V
- Working Flow Rate: 1 to 30 Liters/Minute
- Working Temperature range: -25 to 80°C
- Maximum water pressure: 2.0 MPa
- Output duty cycle: 50% +/-10%
- Output rise time: 0.04us
- Output fall time: 0.18us
- Flow rate pulse characteristics: Frequency (Hz) = $7.5 * \text{Flow rate (L/min)}$
- Pulses per Liter: 450
- Durability: minimum 300,000 cycles

Gambar 4.17 Spesifikasi *Water Flow Meter*

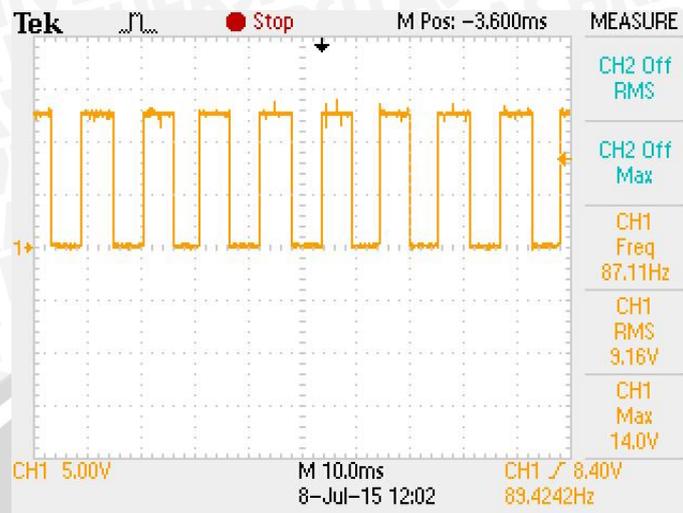
Sumber: <http://www.robotshop.com/>

Selain spesifikasi diperlukan juga sebuah pengujian. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang yang dihasilkan *water flow meter*. Berikut adalah diagram balok pengujian *water flow meter*. Dimana CH1 adalah tegangan masukan dari *water flow meter*.

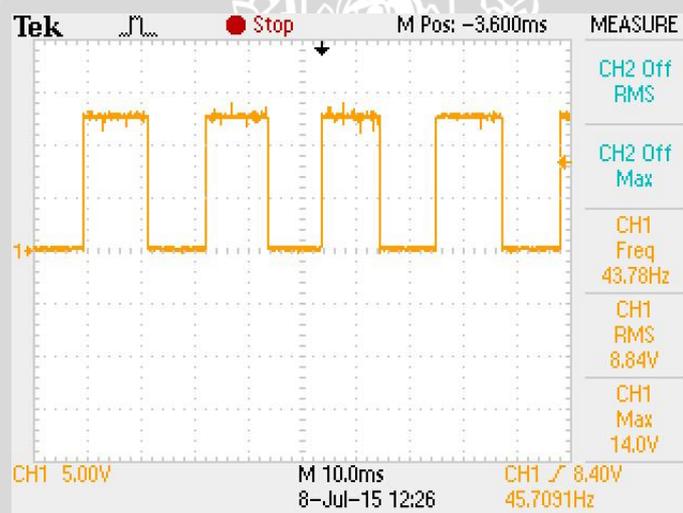


Gambar 4.18 Diagram Balok Pengujian *water flow meter*

Dari pengujian maka didapatkan bentuk gelombang seperti berikut:



Gambar 4.19 Gelombang Tegangan Keluaran *water flow meter* pada Frekuensi 87.11 Hz



Gambar 4.20 Gelombang Tegangan Keluaran *water flow meter* pada Frekuensi 43.78 Hz

Mengkonversi dari besaran frekuensi menjadi besaran debit air.

Menurut spesifikasi *water flow meter*:

$$\text{Frekuensi (Hz)} = 7.5 \times \text{debit air (L/menit)}$$

$$\text{Debit air} = \frac{\text{Frekuensi}}{7.5}$$

Untuk frekuensi 87.11 Hz

$$\begin{aligned}\text{Debit air} &= \frac{87.11}{7.5} \\ &= 11,61 \text{ L/menit}\end{aligned}$$

Untuk frekuensi 43.78 Hz

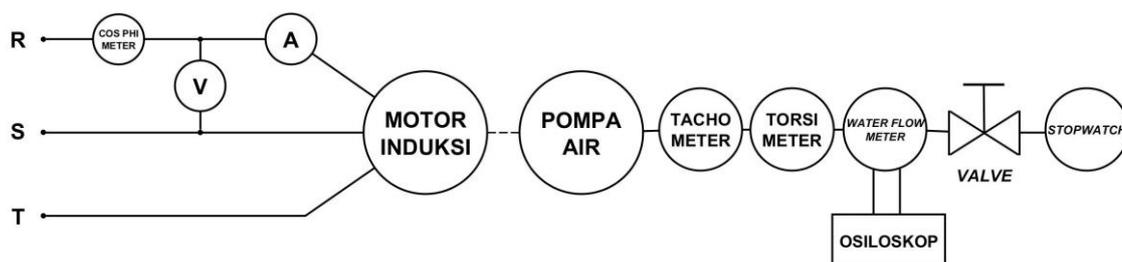
$$\begin{aligned}\text{Debit air} &= \frac{43.78}{7.5} \\ &= 5.83 \text{ L/menit}\end{aligned}$$



BAB V PENGUJIAN DAN ANALISIS

5.1 Pengujian sistem pompa air *Valve*

Pengujian ini dilakukan dengan cara menghitung energi yang diperlukan motor penggerak pompa untuk mengisi air ke sebuah wadah yang bervolume 50 Liter dengan debit air yang berbeda - beda. Debit air diatur dengan cara merubah tuas dari *Valve*. Rangkaian pengujiannya sebagai berikut:



Gambar 5.1 Rangkaian Pengukuran Sistem Pompa Air *Valve*

Melalui hasil pengukuran dan hasil perhitungan terhadap persamaan 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 dan 5-6 maka didapatkan hasil data sebagai berikut:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_{in} \times I_{in} \times \cos \phi_{in} \quad (5-1)$$

$$\text{Energi} = \frac{P_{in} \times \text{waktu}}{60} \quad (5-2)$$

$$P_{out} = T_d \times \omega_r \quad (5-3)$$

$$\omega_r = \frac{2 \times \pi \times n_r}{60} \quad (5-4)$$

$$P_{out \text{ Air}} = \frac{\gamma \times Q \times H}{1000 \times 60} \quad (5-5)$$

$$\text{Efisiensi} = \frac{P_{out \text{ Air}}}{P_{in}} \times 100\% \quad (5-6)$$

Diketahui

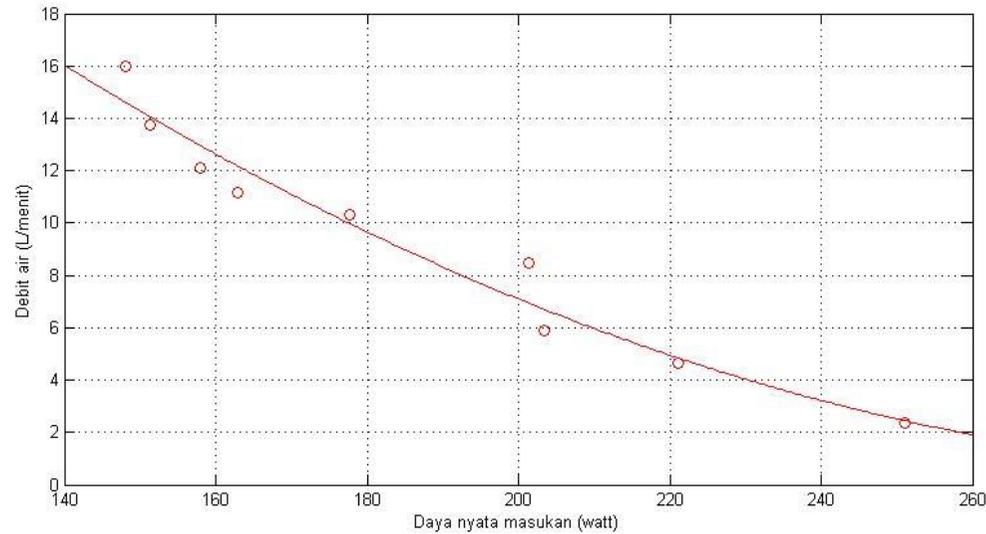
$$\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$$

$$H = 25\text{m}$$



Tabel 5.1 Data Hasil Pengujian Sistem Pompa Air *Valve*

Q (L/menit)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	cos φ _{in}	P _{in} (W)	Waktu (menit)	Energi (Wh)	n _r (rpm)	T _d (Nm)	P _{out} (W)	P _{out} Air (W)	Efisiensi (%)
2.37	380	1.09	0.35	251.10	21.10	88.29	2820	0.70	206.61	9.69	3.86
4.63	380	1.05	0.32	221.15	10.80	39.80	2830	0.70	207.34	18.93	8.56
5.89	380	1.03	0.30	203.38	8.49	28.77	2840	0.67	199.16	24.08	11.84
8.46	380	1.02	0.30	201.40	5.91	19.84	2850	0.63	187.93	34.58	17.17
10.32	380	1.00	0.27	177.71	4.84	14.35	2865	0.60	179.92	42.18	23.74
11.14	380	0.99	0.25	162.90	4.49	12.19	2870	0.60	180.24	45.53	27.95
12.12	380	0.96	0.25	157.96	4.13	10.86	2870	0.57	171.22	49.54	31.36
13.73	380	0.92	0.25	151.38	3.64	9.19	2880	0.55	165.79	56.12	37.07
16.00	380	0.90	0.25	148.09	3.13	7.71	2950	0.50	154.38	65.40	44.16



Gambar 5.2 Grafik Hubungan Daya Nyata Masukan Motor terhadap Debit Air pada Sistem *Valve*

Dimana:

V_{in} = tegangan masukan motor

I_{in} = arus masukan motor

$\cos \varphi_{in}$ = faktor daya masukan motor

P_{in} = daya nyata masukan motor

Waktu = waktu yang diperlukan untuk mengisi wadah dengan air

Energi = energi yang diperlukan untuk mengisi wadah dengan air

n_r = putaran rotor

ω_r = kecepatan sudut rotor

T_d = torsi yang dibangkitkan pada poros rotor

P_{out} = daya nyata keluaran mekanik yang terdapat pada poros rotor

Q = debit air

γ = berat jenis air

H = tinggi jatuh air

Efisiensi = perbandingan daya keluaran terhadap daya masukan

Dari grafik gambar 5.2 menunjukkan bahwa pada sistem pompa *Valve* semakin kecil debit air yang dibutuhkan maka daya nyata masukan akan semakin besar. Hal ini terjadi karena adanya pertambahan nilai tekanan yang menyebabkan torsi motor tersebut juga ikut bertambah, pertambahan torsi menyebabkan kenaikan di arus stator akibatnya daya nyata masukan semakin besar.

Karena debit air selalu berubah – ubah tergantung kebutuhan maka diambil energi rata-ratanya ($\overline{\text{Energi}}$) dan efisiensi rata-ratanya ($\overline{\text{Efisiensi}}$), yaitu:

$$\overline{\text{Energi}} = \frac{\text{setiap data Energi yang diperoleh}}{\text{banyaknya data}} \quad (5-7)$$

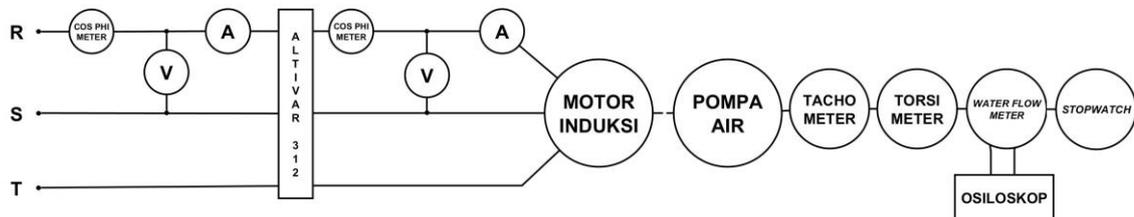
$$\begin{aligned} \overline{\text{Energi Valve}} &= \frac{231,00}{9} \\ &= 25,67 \text{ Wh} \end{aligned}$$

$$\overline{\text{Efisiensi}} = \frac{\text{setiap data Efisiensi yang diperoleh}}{\text{banyaknya data}} \quad (5-8)$$

$$\begin{aligned} \overline{\text{Efisiensi Valve}} &= \frac{228,57}{9} \\ &= 22,86\% \end{aligned}$$

5.2 Pengujian sistem pompa air *Altivar-312*

Pengujian ini dilakukan dengan cara menghitung energi yang diperlukan motor penggerak pompa yang di catu oleh *Altivar-312* untuk mengisi air ke sebuah wadah yang bervolume 50 Liter dengan debit air yang berbeda - beda. Debit air diatur dengan cara merubah frekuensi motor penggerak pompa yang diatur melalui *Altivar-312*. Rangkaian pengujiannya sebagai berikut:



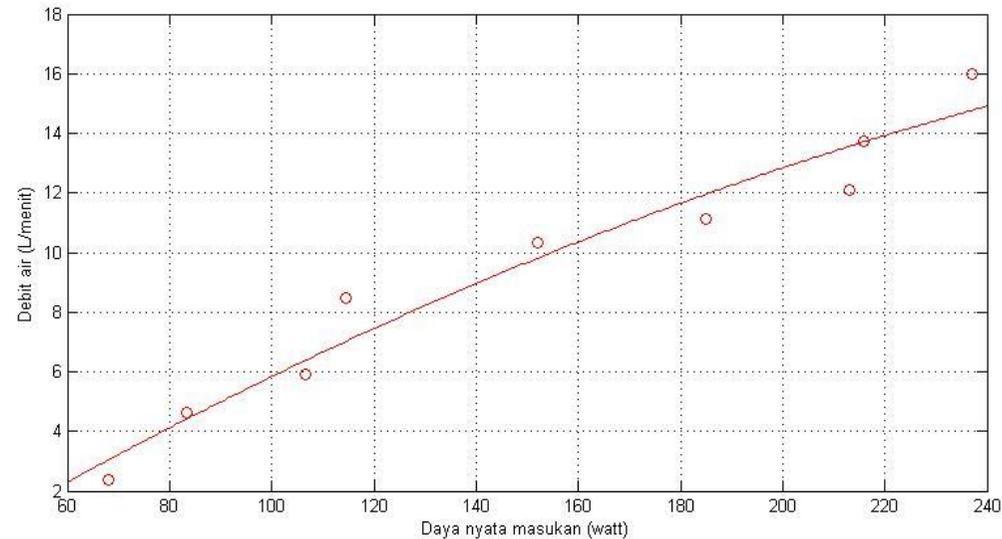
Gambar 5.3 Rangkaian Pengukuran Sistem Pompa Air *Altivar-312*

Melalui hasil pengukuran dan hasil perhitungan terhadap persamaan 5-1, 5-2, 5-3, 5-4, 5-5 dan 5-6 maka didapatkan hasil data sebagai berikut:



Tabel 5.2 Data Hasil Pengujian Sistem Pompa Air *Altivar-312*

Q (L/men)	Frek VSD (Hz)	V _{in} (V)	I _{in} (A)	Cos ϕ_{in}	P _{in} (W)	Waktu (menit)	Energi (Wh)	n _r (rpm)	T _d (Nm)	P _{out} (W)	P _{out} Air (W)	Efisiensi (%)
2.37	10	380	0.45	0.23	68.12	21.10	23.95	590	0.45	27.79	9.69	14.22
4.63	15	380	0.55	0.23	83.26	10.80	14.99	887	0.45	41.78	18.93	22.73
5.89	20	380	0.60	0.27	106.63	8.49	15.09	1180	0.47	58.05	24.08	22.58
8.46	25	380	0.58	0.30	114.52	5.91	11.28	1475	0.48	74.10	34.58	30.19
10.32	30	380	0.66	0.35	152.04	4.84	12.28	1770	0.48	88.92	42.18	27.74
11.14	35	380	0.74	0.38	185.08	4.49	13.85	2070	0.48	104.00	45.53	24.60
12.12	40	380	0.79	0.41	213.18	4.13	14.66	2366	0.50	123.82	49.54	23.24
13.73	45	380	0.82	0.40	215.88	3.64	13.10	2660	0.50	139.21	56.12	26.00
16.00	50	380	0.90	0.40	236.94	3.13	12.34	2950	0.50	154.38	65.40	27.60

Gambar 5.4 Grafik Hubungan Daya Nyata Masukan Motor terhadap Debit Air pada Sistem *Altivar-312*

Dari tabel 5.2 dapat dilihat efisiensi maksimum sistem *Altivar-312* terjadi pada saat:

Debit air	= 8,46 L/menit
Frekuensi VSD	= 25 Hz
V_{in}	= 380 V
I_{in}	= 0,58 A
$\text{Cos } \varphi_{in}$	= 0,3
P_{in}	= 114,52 W
Waktu	= 5.91 menit
Energi	= 11.28 Wh
n_r	= 1475 rpm
T_d	= 0,48 Nm
P_{out}	= 74,10 W
$P_{out \text{ Air}}$	= 34,58 W
Efisiensi	= 30,19 %

Dari grafik gambar 5.3 menunjukkan bahwa pada sistem pompa *Altivar-312* semakin kecil debit air yang dibutuhkan maka daya nyata masukan juga semakin kecil. Hal ini terjadi karena tekanan di pompa selalu tetap, maka besaran torsi dan arus pada stator turun mengikuti debit air.

Dengan melakukan perhitungan terhadap persamaan 5-7 dan 5-8 maka:

$$\begin{aligned} \overline{\text{Energi Altivar} - 312} &= \frac{131,53}{9} \\ &= 14,61 \text{ Wh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{\text{Efisiensi Altivar} - 312} &= \frac{243,23}{9} \\ &= 24,23 \% \end{aligned}$$

Tidak hanya pengukuran langsung di sistem, perhitungan sesuai dengan teori juga diperlukan, untuk membuktikan bahwa pengujian yang dilakukan tidak berbeda jauh dengan teori yang sudah ada.

Diketahui data mesin

$$R_1 = 31,25 \Omega$$

$$R'_2 = 1,55 \Omega$$

$$X_1 = 22,72 \Omega$$

$$X'_2 = 34,08 \Omega$$

$$X_m = 216,16 \Omega$$

$$P_{f+w} = 10,43 \text{ W}$$

$$I_1 = 0,92 \text{ A}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

$$s = 0,017$$

Jawab

$$P_{mek} = P_{f+w} + P_{out}$$

$$T_d = \frac{P_{mek} - P_{f+w}}{\omega_r}$$

$$P_{mek} = (3 \times I_2^2 \times \frac{R'_2(1-s)}{s})$$

$$(I'_2)^2 = \frac{(X_m)^2}{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X'_2 + X_m)^2} I_1^2$$

$$= \frac{(216,16)^2}{\left(\frac{1,55}{0,017}\right)^2 + (0,017 + 216,16)^2} 0,92^2$$

$$= 0,55 \text{ A}$$

$$P_{mek} = (3 \times I_2^2 \times \frac{R'_2(1-s)}{s})$$

$$= (3 \times 0,55 \times \frac{1,55(1-0,017)}{0,017})$$

$$= 152,24 \text{ W}$$

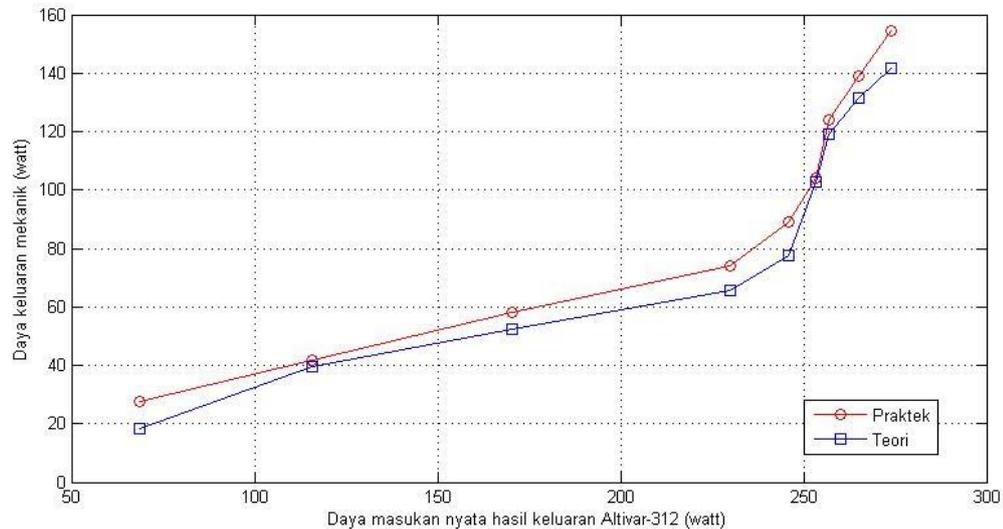
$$T_d = \frac{152,24 - 10,43}{308,76}$$

$$= 0,46 \text{ Nm}$$

Melalui hasil pengukuran dan hasil perhitungan terhadap persamaan 5-1, 5-2, 5-3, dan persamaan di atas maka didapatkan hasil data sebagai berikut:

Tabel 5.3 Data Perbandingan Sistem *Altivar-312* secara Praktek dan Teori

F.VSD (Hz)	V _{VSD} (V)	I _{VSD} (A)	Cos φ VSD	P _{in} (W)	n _r (rpm)	T _d (Nm)		P _{out} (W)	
						Praktek	Teori	Praktek	Teori
10	100	0.40	0.99	68.59	590	0.45	0.30	27.79	18.35
15	135	0.50	0.99	115.74	887	0.45	0.43	41.78	39.56
20	170	0.59	0.98	170.25	1180	0.47	0.42	58.05	52.18
25	215	0.65	0.95	229.95	1475	0.48	0.42	74.10	65.56
30	260	0.70	0.78	245.88	1770	0.48	0.42	88.92	77.71
35	300	0.75	0.65	253.31	2070	0.48	0.48	104.00	102.93
40	350	0.80	0.53	257.04	2366	0.50	0.48	123.82	119.30
45	375	0.85	0.48	265.00	2660	0.50	0.47	139.21	131.47
50	430	0.92	0.40	274.08	2950	0.50	0.46	154.38	141.81



Gambar 5.5 Grafik Hubungan Daya Nyata Masukan terhadap Daya Keluaran Mekanik pada Sistem *Altivar-312*

Pada grafik gambar 5.5 menunjukkan bahwa semakin besar daya nyata masukan maka daya keluaran mekanik juga semakin besar.

5.3 Analisa penghematan energi

Pada sistem pompa konvensional, pengaturan banyak sedikitnya debit air yaitu menggunakan *Valve* yang dioperasikan secara manual dengan cara merubah tuas. Saat tuas di gerakkan untuk menutup sebagian *Valve* maka tekanan didalam pompa bertambah, akibatnya torsi meningkat seiring pertambahannya tekanan. Pertambahan pada torsi akan mengakibatkan arus pada stator yang juga bertambah, arus menyebabkan daya masukan juga bertambah maka terjadilah pemborosan energi listrik.

Berbeda dengan sistem pompa *Variable Speed Drive* yang mengatur putaran motor untuk mengatur banyak sedikitnya debit air, yaitu dengan cara merubah tegangan dan frekuensi sumber yang akan di suplai ke motor. Tujuannya untuk menjaga tekanan air agar tetap yang mempengaruhi besaran daya masukan. Sehingga dengan debit air yang sama *Variable Speed Drive* mampu mengkonsumsi energi listrik yang lebih hemat dibandingkan dengan sistem pompa konvensional, maka terjadilah penghematan energi.

Variable Speed Drive juga dapat mengendalikan arus *starting* yang lebih kecil agar tidak terjadi lonjakan yang menyebabkan pemborosan energi dibandingkan metode star – delta.

Selain itu keuntungan utama penggunaan *Variable Speed Drive*. disamping penghematan energi adalah :

1. Memperpanjang umur sistem sebab pemakaian pompa dan *seal* pencegah kebocoran pompa berkurang karena pengoperasian pompa tidak selalu dalam kecepatan nominal sehingga tekanan pompa air tidak selalu besar yang dapat merusak *seal* tersebut.
2. Penurunan modal dan biaya perawatan dikarenakan kran pengendali, jalur *by-pass*, dan *starter* konvensional tidak diperlukan lagi. Kemampuan *soft starter*, VSD membolehkan motor memiliki arus *starting* yang lebih rendah.

(US DOE, 2004).

5.4 Perhitungan biaya penghematan energi

Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 31 Tahun 2014 Tentang Tarif Tenaga Listrik yang Disediakan Oleh Perusahaan Perseroan (Persero) PT Perusahaan Listrik Negara.

Berikut merupakan Penyesuaian Tarif Tenaga Listrik yang mulai berlaku per tanggal 1 Januari 2015.

TARIF TENAGA LISTRIK UNTUK KEPERLUAN INDUSTRI

NO.	GOL. TARIF	BATAS DAYA	REGULER		PRA BAYAR (Rp/kWh)
			BIAYA BEBAN (Rp/kVA/bulan)	BIAYA PEMAKAIAN (Rp/kWh) DAN BIAYA kVArh (Rp/kVArh)	
1.	I-1/TR	450 VA	26.000	Blok I : 0 s.d. 30 kWh :160 Blok II : di atas 30 kWh :395	485
2.	I-1/TR	900 VA	31.500	Blok I : 0 s.d. 72 kWh :315 Blok II : di atas 72 kWh :405	600
3.	I-1/TR	1.300 VA	*)	930	930
4.	I-1/TR	2.200 VA	*)	960	960
5.	I-1/TR	3.500 VA s.d. 14 kVA	*)	1.112	1.112
6.	I-2/TR	di atas 14 kVA s.d. 200 kVA	**))	Blok WBP = $K \times 972$ Blok LWBP = 972 kVArh = 1.057****)	-
7.	I-3/TM	di atas 200 kVA	**))	Blok WBP = $K \times 1.115$ Blok LWBP = 1.115 kVArh = 1.200 ****)	-
8.	I-4/TT	30.000 kVA ke atas	***))	Blok WBP dan LWBP = 1.191 kVArh = 1.191 ****)	-

Gambar 5.6 Tarif Tenaga Listrik PLN untuk Keperluan Industri

Sumber : <http://www.pln.co.id/>

Dan untuk perhitungan semua sistem diasumsikan memakai daya yang tersambung oleh PLN sebesar 2200 VA.

5.4.1 Perhitungan biaya sistem Valve

Diketahui :

$$\text{Energi Valve} = 25,67 \text{ Wh}$$

$$= 0,0256 \text{ kWh}$$

$$\text{Rp / kWh} = 960$$

Energi yang diperlukan setiap bulannya (E_{VB}) :

$$E_{VB} = \text{Energi Valve} \times 30 \text{ hari}$$

$$= 0,0256 \text{ kWh} \times 30 \text{ hari}$$

$$= 0,768 \text{ kWh}$$

Biaya pemakaian energi setiap bulannya:

$$\text{Biaya perbulan} = E_{VB} \times \text{Rp / kWh}$$

$$= 0,768 \text{ kWh} \times 960$$

$$= \text{Rp. 737,-}$$

5.4.2 Perhitungan biaya sistem *Altivar-312*

Diketahui :

$$\begin{aligned}\overline{\text{Energi Altivar} - 312} &= 14,61 \text{ Wh} \\ &= 0,0146 \text{ kWh}\end{aligned}$$

$$\text{Rp / kWh} = 960$$

Energi yang dikeluarkan setiap bulannya (E_{AB}) :

$$\begin{aligned}E_{AB} &= \overline{\text{Energi Altivar} - 312} \times 30 \text{ hari} \\ &= 0,0146 \text{ kWh} \times 30 \text{ hari} \\ &= 0,438 \text{ kWh}\end{aligned}$$

Biaya pemakaian energi setiap bulannya:

$$\begin{aligned}\text{Biaya perbulan} &= E_{AB} \times \text{Rp/kWh} \\ &= 0,438 \text{ kWh} \times 960 \\ &= \text{Rp. 420,-}\end{aligned}$$

Energi yang dapat di hemat setiap bulannya:

$$\begin{aligned}&= \text{Energi sistem Valve} - \text{Energi sistem Altivar-312} \\ &= 0,768 \text{ kWh} - 0,438 \text{ kWh} \\ &= 0,33 \text{ kWh atau 43\% lebih hemat dari sistem Valve}\end{aligned}$$

Biaya pemakaian energi yang dapat di hemat setiap bulannya:

$$\begin{aligned}&= \text{Biaya sistem Valve} - \text{Biaya sistem Altivar-312} \\ &= \text{Rp. 737,-} - \text{Rp. 420,-} \\ &= \text{Rp. 317,-}\end{aligned}$$

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Untuk perbandingan konsumsi energi listrik antara sistem pompa air yang menggunakan *Altivar-312* sebagai pengatur besar kecilnya jumlah debit air adalah 43% lebih hemat dibandingkan sistem yang menggunakan *Valve*.
2. Efisiensi maksimum yang dapat diperoleh pada sistem yang menggunakan *Altivar-312* sebagai pengatur banyaknya debit air sebesar 30,19% terjadi di frekuensi *Altivar-312* 25 Hz sedangkan untuk efisiensi rata-rata dari sistem *Altivar-312* diperoleh 24,23% dibandingkan dengan sistem *Valve* yaitu dengan efisiensi maksimum 44,16% saat *Valve* dibuka penuh dan efisiensi rata-ratanya sebesar 22,86%.
3. Besar energi listrik yang dapat dihemat setiap bulannya 0,33 kWh dan besar biaya pemakaian energi listrik yang dapat dihemat setiap bulannya Rp. 317,-

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang perlu dilakukan untuk penyempurnaan. Sebaiknya penggunaan motor yang dioperasikan sebagai pompa air memiliki spesifikasi yang mendekati atau sama dengan spesifikasi *Variable Speed Drive* agar efisiensinya lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Fakultas Teknik. 2014. *Panduan Penulisan Skripsi*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Fakultas Teknik. 2012. *Laporan Praktikum Mesin Elektrik*. Malang. Universitas Brawijaya.
- Fakultas Teknik. 2014. *Laporan Praktikum Mesin-Mesin Fluida*. Malang. Universitas Brawijaya.
- Hart, Daniel W. 2011. *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Hutagaol, J. 2010. *Analisis Karakteristik Tegangan dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Generator Induksi dengan Keluaran Satu Fasa*. Medan. Universitas Sumatra Utara.
- Iqbal, M. 2011. *Analisis Performa Generator Induksi Penguatan Sendiri Tiga Fasa Pada Kondisi Steady State*. Medan. Universitas Sumatra Utara.
- Prasetyo, Ria. 2013. *Penghematan Energi Pada Pompa Fasum Menggunakan Variable Speed Drive*, Yogyakarta. Universitas Gadjah Mada.
- Pillai, SK. 1989. *A First Course on Electric Drives*. New Delhi: Wiley Eastern Limited.
- Sen, P.C. 1997. *Principles of Electrical Machines and Power Electronics*. Canada. John Wiley & Sons.
- US Department of Energy (US DOE), Office of Industrial Technologies. 2004. *Variable Speed Pumping – A Guide to Successful Applications. Executive Summary*. USA: Hydraulic.
- Dermanto, Trikueni. 2013. <http://trikueni-desain-sistem.blogspot.com/2013/09/Prinsip-Dasar-Inverter.html>. Diakses tanggal 16 Oktober 2014.

LAMPIRAN

Lampiran 1

Perhitungan P_{f+w} motor

Tabel Perhitungan untuk mencari P_{f+w} motor

No	V_{in} (Volt)	V_{in}^2	P_{in} (Watt)	$y^2 = \ln P_{in}$	$V_{in} y^2$
1	100	10000	15.5885	2.7465	274.6531
2	150	22500	14.0296	2.6412	396.1755
3	200	40000	15.5885	2.7465	549.3061
4	250	62500	26.8468	3.2901	822.5365
5	300	90000	44.6869	3.7997	1139.9042
6	350	122500	78.8083	4.3670	1528.4565
7	380	144400	118.4723	4.7747	1814.3780
Σ	1730	491900	314.0208	24.3658	6525.4100

Karena kurva karakteristik berbentuk eksponen maka perhitungan P_{f+w} dilakukan dengan metode regresi eksponen:

$$7a + 1730b = 24,3658$$

$$a = \frac{(24,3658 - 1730b)}{7}$$

$$1730a + 491900b = 6525,4100$$

$$247,1428(24,3658 - 1730b) + 491900b = 6525,4100$$

$$6021,8320 - 427557,004b + 491900b = 6525,4100$$

$$b = \frac{6525,4100 - 6021,8320}{64342,996}$$

$$= 7,8264 \times 10^{-3}$$

$$a = \frac{(24,3658 - 1730b)}{7}$$

$$= \frac{(24,3658 - 1730 \times 7,8264 \times 10^{-3})}{7}$$

$$= 1,5465$$

$$\ln a = 1,5465$$

$$a = 4,6950$$

Persamaan garis :

$$\begin{aligned}y &= ae^{bx} \\ &= 4,6950e^{(6,3058 \times 10^{-3})x}\end{aligned}$$

P_{f+w} terjadi saat $x = 0$, yaitu titik potong sumbu y, maka:

$$\begin{aligned}P_{f+w} &= 4,6950e^{(6,3058 \times 10^{-3})0} \\ &= 4,6950 \text{ W}\end{aligned}$$

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 2

Perhitungan P_{f+w} pompa

Tabel Perhitungan untuk mencari P_{f+w} pompa

No	V_{in} (Volt)	V_{in}^2	P_{in} (Watt)	$y^2 = \ln P_{in}$	$V_{in} y^2$
1	100	10000	11.5181	2.4439	244.3923
2	150	22500	20.9145	3.0404	456.0665
3	200	40000	33.3247	3.5063	701.2595
4	250	62500	51.0089	3.9320	983.0000
5	300	90000	74.5648	4.3117	1293.5005
6	350	122500	104.2695	4.6470	1626.4425
7	380	144400	133.2813	4.8925	1859.1356
Σ	1730	491900	428.8818	26.7738	7163.7969

Karena kurva karakteristik berbentuk eksponen maka perhitungan P_{f+w} dilakukan dengan metode regresi eksponen:

$$7a + 1730b = 26,7738$$

$$a = \frac{(26,7738 - 1730b)}{7}$$

$$1730a + 491900b = 7163,7969$$

$$247,1428(26,7738 - 1730b) + 491900b = 7163,7969$$

$$6616,9518 - 427557,004b + 491900b = 7163,7969$$

$$b = \frac{7163,7969 - 6616,9518}{64342,996}$$

$$= 8,4989 \times 10^{-3}$$

$$a = \frac{(26,7738 - 1730b)}{7}$$

$$= \frac{(26,7738 - 1730 \times 8,4969 \times 10^{-3})}{7}$$

$$= \frac{(26,7738 - 14,6996)}{7}$$

$$= 1,7248$$

$$\ln a = 1,7248$$

$$a = 5,6113$$

Persamaan garis :

$$\begin{aligned}y &= ae^{bx} \\ &= 5,6113e^{(8.4989 \times 10^{-3})x}\end{aligned}$$

P_{f+w} terjadi saat $x = 0$, yaitu titik potong sumbu y , maka:

$$\begin{aligned}P_{f+w} &= 5,6113e^{(849695 \times 10^{-3})0} \\ &= 5,6113W\end{aligned}$$

