

ANALISIS EKONOMIS PENGGUNAAN VARIABLE SPEED DRIVE SEBAGAI PENGENDALI MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

Tegar Arieayasha Fikri¹⁾, Azriyenni²⁾

^{1,2)}Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Jl. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode 28293
Email: tegar.arieayasha2091@student.unri.ac.id

ABSTRACT

PT RAPP is one of the companies that uses a three-phase induction motor in production where the motor is used as a pump, pulp dryer, or conveyor. Some districts in PT RAPP have used VSDs as controllers for three-phase induction motors, but some are still using the DOL system. This study aims to compare the energy use of a three-phase induction motor when it is connected to Direct On-Line (DOL) and when it is controlled by a Variable Speed Drive (VSD). This study also aims to analyze from an economic aspect, namely the total energy tariff per year and the calculation of the Pay Back Period (PBP) or the refund period. This research was conducted by collecting motor work data for a month. The research was conducted by observing the research subject, then collecting data on motor performance. The research data were taken from two districts, namely Fiberline 1 and Fiberline 2, the data that has been obtained will be calculated. There are 3 calculations in this research, namely calculation of total electrical energy, calculation of electricity rates and calculation of PBP. The results of this calculation will produce a large amount of electric energy when a three-phase induction motor is connected to the DOL and when VSD is controlled, savings in electricity rates when using a VSD and a period of return on investment in VSD installation. The results of data analysis on Fiberline 1 show the amount of energy saved when the motor uses a VSD of 802847.665 kWh with a large energy tariff savings of IDR 9,602,764,579,345 and a payback period of 7 months. In Fiberline 2, it shows the amount of energy saved when the motor uses a VSD of 694543.902 kWh with a large energy saving of Rp. 8,307,356,266,554 and a payback period of 13 months.

Keyword: DOL, Energy, Induction Motor, Payback Period, VSD

PENDAHULUAN

Dewasa ini diberbagai negara sudah sangat peduli terhadap pemanfaatan energi listrik secara efektif dengan kata lain *Saving Energy* atau “Hemat Energi-Hemat Biaya”(Indra Kusuma,2017). Dalam kebijakan energi nasional yang dituangkan dalam Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 Tentang Energi, konservasi energi adalah upaya sistematis, terencana, terpadu guna melestarikan sumber daya energi dalam negeri dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya energi. PT RAPP sebagai salah satu industri pulp dan kertas terbesar di dunia dengan kapasitas produksi 2,5 juta ton pulp dan 1,15 juta ton kertas per tahun. PT RAPP menggunakan banyak motor listrik dalam proses produksinya. Motor

listrik yang sering digunakan adalah motor induksi tiga phasa, hal ini karena konstruksinya yang sederhana, harga lebih murah, dan perawatannya juga mudah. Motor induksi mengonsumsi sekitar 90-95% dari total total konsumsi energi oleh motor listrik, yang setara dengan kira-kira 53% total konsumsi energi listrik (W. Leonhard, 1997).

Motor induksi mempunyai kecepatan putaran rotor yang konstan dan memiliki efisiensi yang cukup baik. Dalam industri pulp dan kertas ini, motor induksi tidak selalu memerlukan kecepatan putaran yang konstan, karena penggunaan yang bervariasi, beban yang digerakkan oleh motor juga bervariasi. Langkah yang dapat digunakan untuk mengendalikan kecepatan putar dari motor adalah dengan mengubah nilai frekuensi

tegangan AC yang masuk ke dalam motor. Apabila digunakan untuk memutar beban dan beban bertambah maka kecepatan juga akan berubah. Mengubah frekuensi pada motor induksi juga berpengaruh pada daya yang dibutuhkan pada motor, semakin kecil frekuensi semakin kecil juga daya yang dibutuhkan. Secara tidak langsung mengatur frekuensi dapat menghemat pemakaian daya. Oleh karena itu, untuk mengatasi hal tersebut maka dibutuhkan *Variable Speed Drive* (VSD) (Yogi Pranata, 2018).

Variable Speed Drive atau biasa disebut VSD adalah sebuah alat yang terdiri dari *rectifier*, filter, *inverter* dan panel kontrol untuk mengatur nilai output yang dihasilkan. Nilai yang akan dikontrol oleh VSD adalah nilai frekuensi dari tegangan output yang akan masuk ke motor. Pengaturan nilai frekuensi ini dimaksudkan untuk mendapatkan kecepatan putaran yang diinginkan sehingga sesuai dengan kebutuhan. Menurut M.Pemberton, sekitar 20% sampai 50% dari daya yang dikonsumsi oleh motor listrik bisa dihemat melalui *variable speed operation*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana perbandingan ekonomis penggunaan VSD ABB ACS880 sebagai kendali kecepatan motor induksi tiga fasa dibandingkan dengan *direct on-line* atau biasa disebut DOL.

TINJAUAN PUSTAKA

Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi merupakan motor arus bolak balik yang paling banyak digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara kecepatan rotasi rotor dan kecepatan rotasi medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator.

Kumparan stator yang dihubungkan oleh suatu sumber tegangan tiga fasa akan menghasilkan medan magnet yang berotasi dengan kecepatan rotasi sinkron ($n_s = 120f/p$). Medan magnet putar pada stator tersebut akan memotong penghantar-penghantar pada rotor,

sehingga terinduksi arus dan sesuai hukum Lenz rotor akan turut berputar mengikuti medan magnet putar stator. Perbedaan kecepatan rotasi relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban akan memperbesar torsi beban motor, sehingga memperbesar arus induksi pada rotor, dan slip antara medan magnet putaran stator dan putaran rotor juga akan bertambah besar.

Perputaran motor pada motor arus bolak balik ditimbulkan oleh adanya medan magnet putar (fluks yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan magnet putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak, umumnya tiga fasa. Hubungan dapat berupa hubungan bintang atau delta (Zuhail, 2004).

Variable Speed Drive

Konsep dasar VSD adalah mengubah sumber daya AC menjadi DC melalui penyearah yang dikontrol atau tidak, dan kemudian diubah kembali menjadi AC untuk memberi tegangan pada motor yang dapat diatur besar frekuensinya. Dengan menggunakan *inverter* yaitu suatu alat yang dapat mengubah daya arus searah menjadi arus bolak balik, frekuensi yang dihasilkan dapat diubah. Perubahan frekuensi arus bolak balik dari *inverter* ditentukan oleh periode pulsa yang memacu penyearah yang digunakan. Dengan mempercepat atau memperlambat periode pulsa yang memicu *thyristor*, frekuensi dan juga kecepatan motor dapat diatur (Zuhail, 2004).

Variable speed drive mempertahankan nilai tegangan keluaran ke frekuensi (V/F) dengan nilai rasio konstan pada semua kecepatan untuk alasan yang berikut. Tegangan fasa (V), frekuensi (f) dan fluks magnetik (Φ) motor terkait dengan persamaan (M. Suyanto, 2019):

$$V = 4.444f\Phi m \quad (1)$$

$$V/f = 4.444\Phi m \quad (2)$$

Jika tegangan yang sama diterapkan pada frekuensi yang berkurang, maka fluks magnetik akan meningkat dan menjenuhkan inti magnetik, secara signifikan mendistorsi kinerja motor sehingga bekerja pada daerah yang tidak sesuai dengan perancangan.

Saturasi magnetik dapat dihindari dengan menjaga konstan Φ_m sesuai dengan perancangan seperti pada rumus 2 (M. Suyanto, 2019).

Metode Pengembalian Dana Dalam Penggunaan VSD

Penghematan energi adalah unsur yang penting dalam kebijakan energi. Penghematan energi menurunkan konsumsi energi dan permintaan energi per kapita, sehingga dapat menutup meningkatnya kebutuhan energi akibat pertumbuhan populasi. Hal ini mengurangi naiknya biaya energi, dan dapat mengurangi kebutuhan pembangkit energi atau impor energi. Produksi energi lebih fleksibel karena permintaan energi berkurang (N. Hadinata, 2018).

Nilai ekonomis dari penggunaan VSD dapat dilakukan dengan beberapa perhitungan dengan mengkalkulasikan biaya operasional saat tanpa VSD, dan biaya operasional saat memakai VSD. Selisih dari hasil kalkulasi biaya operasional kedua sistem menghasilkan nilai penghematan biaya operasional saat menggunakan VSD. Berikut rumus kalkulasi biaya (Saidur, R, 2012):

$$PB = (W_0 - W_1) \times t \times TDL \quad (3)$$

Dimana,

PB = Penghematan Biaya

W_0 = Energi tanpa VSD

W_1 = Energi dengan VSD

t = Waktu

TDL = Tarif Dasar Listrik

Payback period atau PBP adalah sebuah parameter yang menghitung seberapa cepat waktu yang diperlukan untuk mengembalikan suatu investasi, sehingga satuan yang dipergunakan adalah tahun, bulan dan hari. Sebagai kriteria penilaiannya adalah, apabila nilai PBP-nya lebih panjang dari waktu yang disyaratkan maka proyek ditolak, sedangkan apabila waktunya lebih pendek maka proyek diterima (Sugirianta, 2016). Biaya yang digunakan untuk penggunaan VSD dan penghematan biaya operasional didapatkan, PBP dapat dikalkulasikan dengan menggunakan rumus (Saidur, R, 2012):

$$PBP = \frac{\text{Total Biaya Investasi}}{\text{Total Penghematan Biaya}} \times 12 \text{ Bulan} \quad (4)$$

Daya dan Energi

Energi yang digunakan alat listrik merupakan laju penggunaan energi (daya) dikalikan dengan waktu selama alat tersebut digunakan. Bila daya diukur dalam watt jam. Besar daya listrik pada sistem tiga phasa dapat dihitung dengan rumus berikut (Chapman, 2005):

$$P = \sqrt{3}V \times I \times \cos\phi \quad (5)$$

Dimana,

P = Daya

V = Tegangan

I = Arus

$\cos\phi$ = Faktor Daya

Besarnya energi listrik sebanding dengan besarnya daya yang terpakai pada peralatan listrik tersebut dan dalam waktu yang digunakan. Untuk menghitung energi yang diberikan sumber listrik diformulasikan dengan persamaan (Sudirham, 2002):

$$W = \int_0^t P(t) dt \quad (6)$$

$$W = P t \quad (7)$$

Keterangan :

P = Daya (W)

V = Tegangan jala-jala (V)

I = Arus (A)

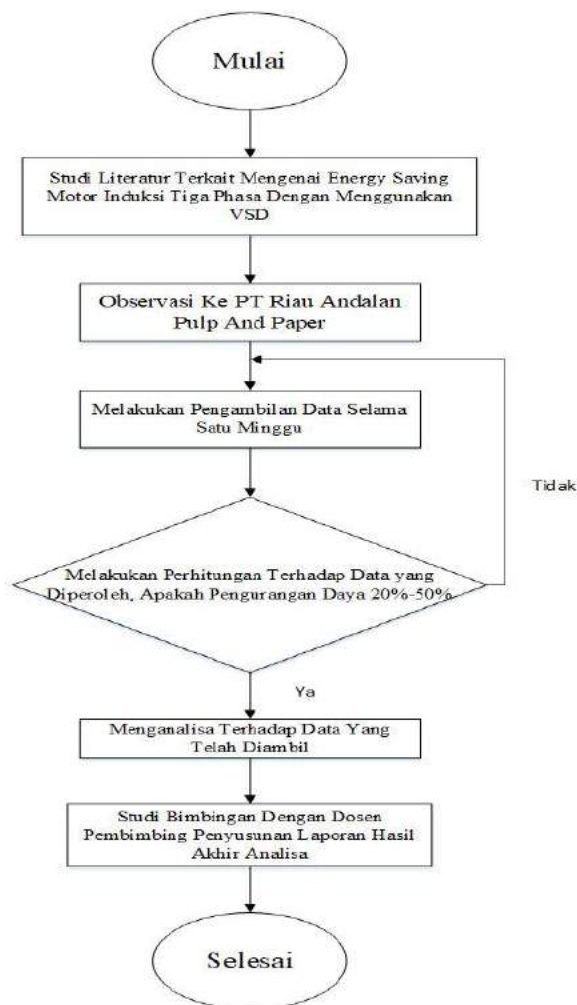
W = Energi (Wh)

t = Waktu (hours)

METODOLOGI

Pada pelaksanaan studi ini dilakukan penelitian dengan data performa motor induksi tiga phasa yang didapatkan dari PT Riau Andalan Pulp and Paper (PT RAPP) dari dua distrik yang berbeda. Data kerja motor yang diambil berada di distrik *Fiberline 1* dan *Fiberline 2*, dengan jumlah 13 motor induksi tiga phasa yang dikendalikan dengan VSD dan 13 motor induksi tiga phasa yang dihubungkan DOL. Pengambilan data motor yang dikendalikan VSD menggunakan *software* perusahaan yaitu Drive Composer Pro 2.4. Untuk data motor yang dihubungkan DOL dilakukan oleh rekan PLC-VSD Specialist dengan menggunakan PI Processbook (*Trend Display*). Lalu data-data kerja motor dikalkulasi total energi listrik dan tarifnya untuk dilakukan analisis ekonomis penggunaan motor induksi tiga phasa saat dikendalikan VSD dan saat dihubungkan DOL.

Gambar 1 memaparkan diagram alir penelitian.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Pengambilan Data Motor dan VSD

. Pada penelitian ini data motor induksi tiga phasa dan VSD berasal dari dua distrik yaitu dari *Fiberline 1* dan *Fiberline 2*. Dimana pada *Fiberline 1* terdapat data *nameplate* 6 motor induksi tiga phasa yang dihubung secara DOL dan dihubung dengan VSD. Tabel 1 merupakan *nameplate* motor induksi tiga phasa yang digunakan di *Fiberline 1* dalam laporan penelitian ini.

Tabel 1. *Nameplate* Motor Induksi Tiga Phasa Di *Fiberline 1*

Arus	423 A
Tegangan	660 V
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan Motor	1490 Rpm
Daya	400 kW
Cos ϕ	0,86

Pada penelitian ini akan dilakukan pengambilan data terhadap 6 unit VSD yang digunakan untuk mengendalikan motor induksi tiga phasa di *Fiberline 1*. Tabel 2 memaparkan *Nameplate* VSD yang digunakan di *Fiberline 1* secara lengkap.

Tabel 2 *Nameplate* VSD Di *Fiberline 1*

Tegangan Input (U_1)	525/600/690 V
Arus Input (I_1)	430 A
Frekuensi Input (f_1)	50/60 Hz
Tegangan Output (U_2)	0 - U_1 V
Arus Output (I_2)	430A
Frekuensi Output (f_2)	0 - 500 Hz
Daya Output (S_n)	514 kVA

Pada *Fiberline 2* terdapat masing-masing 7 unit motor induksi tiga phasa yang dihubung secara DOL dan dihubung dengan VSD. Tabel 3 merupakan *nameplate* motor induksi tiga phasa yang dihubung secara DOL yang digunakan pada *Fiberline 2*.

Tabel 3 *Nameplate* Motor Induksi Tiga Phasa dihubung DOL *Fiberline 2*

Arus	50 A
Tegangan	6600 V
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan Motor	1490 Rpm
Daya	470 kW
Cos ϕ	0,85

Tabel 4 merupakan *nameplate* motor induksi tiga phasa yang dikendalikan VSD yang digunakan pada *Fiberline 2*.

Tabel 4 *Nameplate* Motor Induksi Tiga Phasa dihubung VSD *Fiberline 2*

Arus	490 A
Tegangan	690 V
Frekuensi	50 Hz
Kecepatan Motor	1490 Rpm
Daya	470 kW
Cos ϕ	0,87

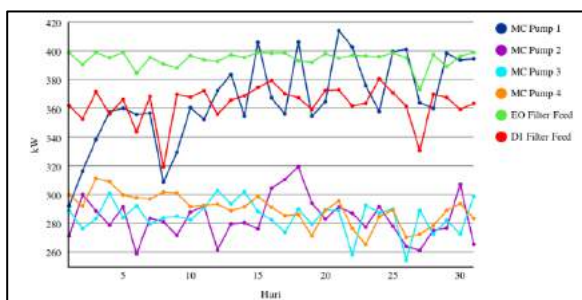
Pada penelitian ini juga dilakukan pengambilan data terhadap 7 unit VSD yang digunakan untuk mengendalikan motor induksi tiga phasa di *Fiberline 2*. Tabel 5 memaparkan *Nameplate* VSD yang digunakan di *Fiberline 2* secara lengkap.

Tabel 5 Nameplate VSD Di *Fiberline 2*

Tegangan Input (U_1)	525/600/690 V
Arus Input (I_1)	590 A
Frekuensi Input (f_1)	50/60 Hz
Tegangan Output (U_2)	0 - U_1 V
Arus Output (I_2)	590A
Frekuensi Output (f_2)	0 - 500 Hz
Daya Output (S_n)	705 kVA

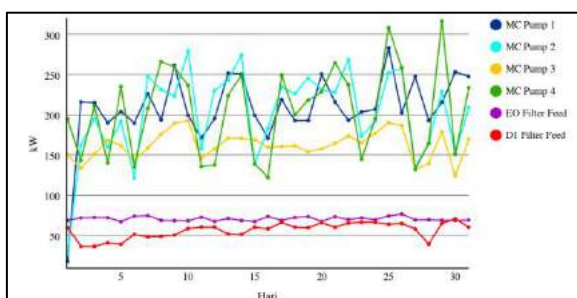
Pengambilan Data Kinerja Motor Induksi Tiga Phasa

Pada *Fiberline 1* pengambilan data daya kerja motor induksi tiga phasa yang dihubungkan DOL dilakukan selama 31 hari dimulai pada tanggal 7 Desember 2020. Terdapat 6 motor induksi yang dicatat data dayanya, dimana masing-masing motor bekerja sebagai pompa produk berupa *pulp*. Gambar 2 memaparkan grafik data daya motor per-hari, data ini akan digunakan untuk kalkulasi besar energi motor induksi yang dihubungkan DOL di *Fiberline 1*.



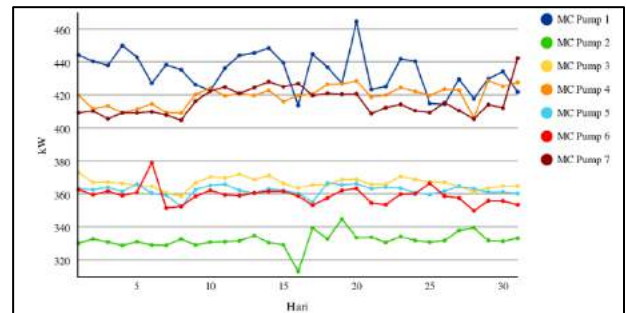
Gambar 2 Grafik Daya Motor Induksi Dihubung DOL *Fiberline 1*

Pengambilan data daya kerja motor induksi yang dikendalikan dengan VSD dilakukan selama 31 hari dimulai pada tanggal 7 Desember 2020. Gambar 3 merupakan grafik daya motor induksi tiga phasa saat dikendalikan VSD selama 31 hari.



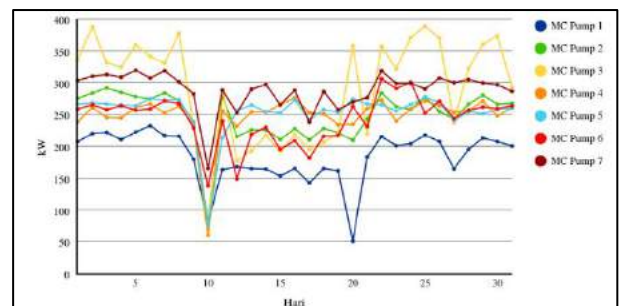
Gambar 3 Grafik Daya Motor Induksi Dihubung VSD *Fiberline 1*

Dilakukan hal yang sama dengan *Fiberline 1*, pada *Fiberline 2* pengambilan data daya kerja motor induksi tiga phasa yang dihubungkan DOL. Terdapat 7 motor induksi yang dicatat data dayanya, dimana masing-masing motor bekerja sebagai pompa produk. Gambar 4 memaparkan grafik daya tiap motor induksi per-hari yang dihubungkan DOL di *Fiberline 2*.



Gambar 4 Grafik Daya Motor Induksi Dihubung DOL Di *Fiberline 2*

Selanjutnya pengambilan data motor induksi yang dikendalikan VSD di *Fiberline 2* sama seperti pengambilan data daya motor induksi saat dikendalikan VSD di *Fiberline 1*. Pada *Fiberline 2* terdapat 7 unit motor induksi. Gambar 5 memaparkan grafik daya motor induksi tiga phasa saat dikendalikan VSD di *Fiberline 2*.



Gambar 5 Grafik Daya Motor Induksi Dihubung VSD Di *Fiberline 2*

Pengambilan Data Biaya VSD

Pengambilan data biaya VSD merupakan rincian biaya pemasangan VSD pada MCC *Fiberline 1* dan *Fiberline 2*. Data ini diperlukan dalam analisa karena tujuan dari penelitian adalah untuk menilai penggunaan VSD dari segi ekonomisnya, sehingga dapat membantu dalam analisis dari aspek biaya.

Data biaya ini akan digunakan untuk mengkalkulasi *payback period* atau periode

dana balik. Tabel 6 memaparkan biaya pemasangan VSD di *Fiberline 1*.

Tabel 6 Tabel Biaya Pemasangan VSD *Fiberline 1*

Material	Kuantitas	Harga	Total
VSD ABB ACS880-07-0430A-7	6	\$ 54.063,20	\$ 324.379,20
Power Cable	1500	\$ 45,00	\$ 67.500,00
Trafo 20kV/690V	1	\$ 38.214,30	\$ 38.214,30
Total Biaya			\$ 430.093,50
Total Biaya			Rp 6.039.329.917,65

Biaya pemasangan VSD menggunakan kurs dollar Amerika Serikat, namun untuk mempermudah kalkulasi di selanjutnya maka total biaya di ubah kedalam kurs rupiah

Indonesia, dimana 1 dollar Amerika Serikat sama dengan Rp 14.041,9. Tabel 7 memaparkan rincian biaya pemasangan VSD di *Fiberline 2* dan total biaya pemasangannya.

Tabel 7 Tabel Biaya Pemasangan VSD *Fiberline 2*

Material	Kuantitas	Harga	Total
VSD ABB ACS880-07-0590A-7	7	\$ 69.837,60	\$ 488.863,20
Power Cable	2500	\$ 45,00	\$ 112.500,00
Trafo 20kV/690V	1	\$ 38.214,30	\$ 38.214,30
Total Biaya			\$ 639.577,50
Total Biaya			Rp 8.980.883.297,25

Kalkulasi Ekonomis

Data yang diperoleh akan diolah dan dianalisis dengan membandingkan dua jenis data yang diperoleh. Perhitungan data yang diambil secara manual menggunakan rumus-rumus dari jurnal-jurnal terkait dengan penelitian. Langkah-langkah pengolahan data untuk Analisis Ekonomis Penggunaan *Variable Speed Drive* Sebagai Pengendali Motor Induksi Tiga Fasa adalah:

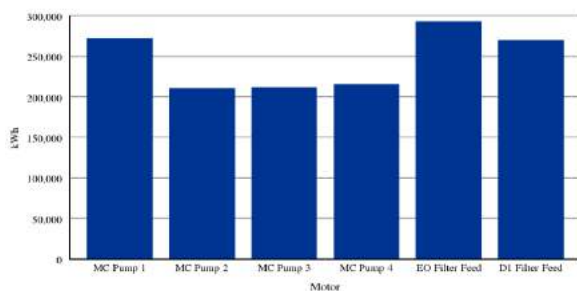
- Kalkulasi total energi listrik yang terpakai oleh motor induksi tiga fasa. Rumus untuk menghitung besar energi digunakan persamaan (6).
- Kalkulasi selisih tarif energi listrik yang terpakai. Penghematan biaya energi dihitung untuk mengetahui besar tarif per-tahunnya, maka rumus untuk menghitung selisih tarif energi listrik per-tahun menggunakan persamaan (3).
- Kalkulasi *Pay Back Period*. Perhitungan ini dilakukan agar kita dapat mengetahui apakah dengan menggunakan VSD akan mengalami kerugian atau tidak. Kalkulasi *Pay Back Period* dilakukan dengan menggunakan persamaan (4).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini membahas analisis hasil pengumpulan data kerja motor induksi yang dihubungkan DOL dan motor induksi tiga fasa saat dikendalikan VSD selama 31 hari. Dan juga membahas analisis perbandingan saat motor induksi dihubungkan DOL dan saat dikendalikan VSD.

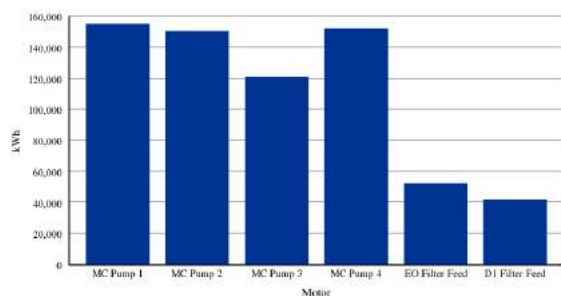
Kalkulasi Data Total Energi *Fiberline 1*

Pada penelitian ini telah diperoleh data daya motor induksi selama satu bulan. Maka dilakukan tahap perhitungan besar energi yang terpakai menggunakan persamaan 6. Energi dikalkulasikan per-hari dan jumlah energi per-hari akan ditotalkan menjadi total energi yang terpakai selama 1 bulan. Daya yang digunakan untuk kalkulasi energi motor induksi yang dihubungkan DOL digunakan dari data daya yang diperoleh sebelumnya. Setelah besar energi per-hari dihitung, maka dilakukan perhitungan total energi listrik per-tahunnya. Perhitungan ini dilakukan untuk dapat dilanjutkan menghitung tarif energi listrik per-tahun nantinya. Gambar 6 merupakan diagram total energi motor induksi saat dihubungkan DOL di *Fiberline 1*.



Gambar 6 Diagram Total Energi Sistem DOL *Fiberline 1*

Selanjutnya, dilakukan kalkulasi besar energi harian pada saat motor induksi dikendalikan dengan menggunakan VSD. Gambar 7 memaparkan grafik total energi tiap motor induksi saat dikendalikan VSD di *Fiberline 1* yang didapat dari hasil kalkulasi.



Gambar 7 Diagram Total Energi Sistem VSD *Fiberline 1*

Berdasarkan hasil dari kalkulasi energi per-hari, didapat total penggunaan energi motor induksi tiga phasa di *Fiberline 1*. Saat motor induksi tiga phasa dihubung DOL berdasarkan hasil perhitungan, total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dihubung DOL sebesar 1474802,924 kWh dan total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dikendalikan dengan VSD sebesar 671955,259 kWh. Dapat dilihat dari hasil perhitungan energi yang dihemat saat motor memakai VSD sebesar 802847,665 kWh.

Kalkulasi Selisih Biaya Energi Listrik *Fiberline 1*

Untuk menghitung selisih biaya energi listrik yang terpakai di *Fiberline 1* dapat digunakan persamaan 3. Berdasarkan

keputusan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) tentang tarif tenaga listrik yang disediakan oleh PT PLN untuk kebutuhan industri terdapat pada tabel 8.

Tabel 8 Tabel Tarif Energi Listrik

Keperluan Daya	Tarif
> 200 kVA	Rp 1.114,74/kWh
>= 30.000 kVA	Rp 996,74/kWh

Tarif tegangan tinggi untuk penggunaan industri yaitu Rp 996,74/kWh. Waktu dalam perhitungan ini adalah 12 bulan. Berikut selisih biaya energi listrik saat motor dihubung DOL dengan saat motor dikendalikan dengan VSD di *Fiberline 1* menggunakan persamaan 3:

$$PB = (1474802,924 \text{ kWh} - 671955,259 \text{ kWh}) \times 12 \times 996,74$$

$$\text{Penghematan Biaya} = \text{Rp } 9.602.764.579,345$$

Dimana PB adalah penghematan biaya. Berdasarkan dari hasil kalkulasi di dapatkan hasil selisih biaya energi listrik per-tahun di *Fiberline 1* sebesar Rp 9.602.764.579,345.

Kalkulasi PBP *Fiberline 1*

Berikut hasil perhitungan PBP pada *Fiberline 1*:

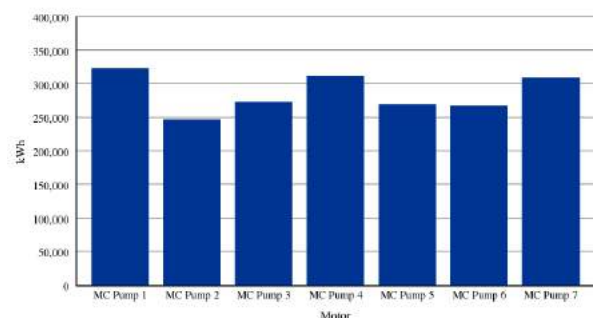
$$PBP = \frac{6.039.329.917,65}{9.602.764.579,345} \times 12 = 7,547 \text{ Bulan}$$

$$PBP \approx 7 \text{ Bulan}$$

Dari hasil kalkulasi diatas dapat diambil kesimpulan *payback period* atau periode pengembalian dana pemasangan VSD di *Fiberline 1* selama 7 Bulan.

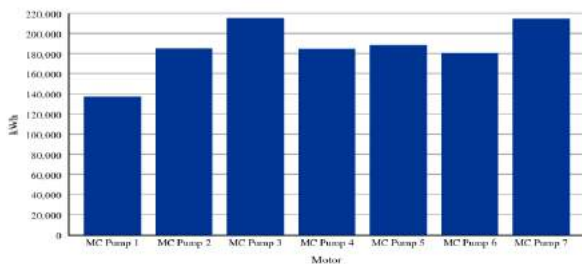
Kalkulasi Data Total Energi *Fiberline 2*

Untuk perhitungan besar energi yang terpakai pada *Fiberline 2* menggunakan cara yang sama dengan kalkulasi pada *Fiberline 1*. Gambar 8 memaparkan diagram total energi tiap motor induksi saat dihubung DOL di *Fiberline 2* yang didapat dari hasil kalkulasi.



Gambar 8 Diagram Total Energi Sistem DOL *Fiberline 2*

Selanjutnya, dilakukan kalkulasi besar energi harian pada saat motor induksi dikendalikan dengan menggunakan VSD. Gambar 9 memaparkan diagram total energi tiap motor induksi saat dikendalikan VSD di *Fiberline 2* yang didapat dari hasil kalkulasi.



Gambar 9 Diagram Total Energi Sistem VSD *Fiberline 2*

Berdasarkan hasil dari kalkulasi energi per-hari, didapat total penggunaan energi motor induksi tiga fasa di *Fiberline 2*. Saat motor induksi tiga fasa dihubung DOL berdasarkan hasil perhitungan, total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dihubung DOL sebesar 2000460,295 kWh dan total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dikendalikan dengan VSD sebesar 1305916,393 kWh. Dapat dilihat dari hasil perhitungan energi yang dihemat saat motor memakai VSD sebesar 694543,902 kWh.

Kalkulasi Selisih Biaya Energi Listrik *Fiberline 2*

Berikut selisih biaya energi listrik saat motor dihubung DOL dengan saat motor dikendalikan dengan VSD di *Fiberline 2* menggunakan persamaan 3:

$$PB = (2000460,295kWh - 1305916,393kWh) \times 12 \times 996,74$$

$$\text{Penghematan Biaya} = \text{Rp } 8.307.356.266,554$$

Berdasarkan dari hasil kalkulasi di dapatkan hasil selisih biaya energi listrik per-tahun di *Fiberline 2* sebesar Rp 8.307.356.266,554.

Kalkulasi PBP *Fiberline 2*

Berikut hasil perhitungan PBP pada *Fiberline 2*:

$$PBP = \frac{8.980.883.297,25}{8.307.356.266,554} \times 12 = 12,973 \text{ Bulan}$$

$$PBP \approx 13 \text{ Bulan}$$

Dari hasil kalkulasi diatas dapat diambil kesimpulan *payback period* atau periode pengembalian dana pemasangan VSD di *Fiberline 2* selama 13 Bulan.

Validasi Data

Validasi data dilakukan dengan membandingkan total energi dari lapangan dengan total energi yang dikalkulasikan secara teori. Besar energi yang digunakan motor induksi tiga fasa di PT RAPP dikalkulasikan dengan menggunakan persamaan 6, dimana daya motor induksi per-hari dikalikan dengan 24, dikarenakan motor beroperasi selama 24 jam dalam satu hari. Data daya motor induksi dikumpulkan dari 2 distrik yang berbeda, yaitu *Fiberline 1* dan *Fiberline 2*. Pada *Fiberline 1* dilakukan pencatatan data terhadap daya 6 unit motor induksi tiga fasa saat dihubung DOL dan saat dikendalikan dengan VSD. Untuk *Fiberline 2* pencatatan data daya motor induksi tiga fasa sebanyak 7 unit saat dihubung DOL dan saat dikendalikan VSD.

Berdasarkan dari data yang telah didapat sebelumnya, daya dapat dikalkulasikan dengan menggunakan persamaan 5. Pada saat motor induksi tiga fasa dihubung DOL di *Fiberline 1* motor dihubung dengan tegangan sebesar 660V dengan arus 423 A, dan $\cos\phi$ 0,86. Maka daya motor induksi di *Fiberline 1* sebesar:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi$$

$$P = \sqrt{3} \times 660 \times 423 \times 0,86$$

$$P = 415856,39 \text{ W}$$

$$P = 415,86 \text{ kW}$$

Setelah mengetahui besar daya motor induksi tiga fasa, maka besar energi dapat dikalkulasikan. Karena terdapat 6 unit motor induksi tiga fasa besar energi listrik akan dikali 6, maka dapat dikalkulasikan besar energi listrik motor induksi tiga fasa di *Fiberline 1* sebesar:

$$W = P \times t$$

$$W = 415856,39 \times (24 \times 31)$$

$$W = 309.397.154,16 \text{ Wh}$$

$$W = 309.397,15 \text{ kWh}$$

$$W_{6 \text{ motor}} = 309.397,15 \times 6 = 1.856.382,9 \text{ kWh}$$

Pada saat motor induksi tiga fasa dikendalikan dengan VSD di *Fiberline 1*

besar tegangan dan arus yang digunakan motor induksi berdasarkan data yang telah diperoleh. Lalu besar daya akan dikalkulasikan dan daya yang didapat akan digunakan untuk mengkalkulasikan besar energi listrik saat motor induksi tiga fasa dikendalikan VSD di *Fiberline 1*. Tabel 8 merupakan hasil kalkulasi total energi pertahun motor induksi yang dikendalikan VSD di *Fiberline 1*.

Tabel 9 Tabel Total Energi Sistem VSD *Fiberline 1* Secara Teori

Motor	W (kWh)
MC Pump 1	149785,99
MC Pump 2	143953,87
MC Pump 3	117480,63
MC Pump 4	150466,02
EO Filter Feed	75747,11
D1 Filter Feed	70285,86
Total	707719,49

Berdasarkan hasil dari kalkulasi energi per-hari, didapat total penggunaan energi motor induksi tiga fasa di *Fiberline 1*. Saat motor induksi tiga fasa dihubung DOL berdasarkan hasil perhitungan, total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dihubung DOL sebesar 1856382,9 kWh dan total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dikendalikan dengan VSD sebesar 707719,49 kWh. Dapat dilihat dari hasil perhitungan energi yang dihemat saat motor memakai VSD sebesar 1148663,9 kWh.

Berdasarkan dengan data daya hasil pengamatan dilapangan, perhitungan total energi harian di *Fiberline 1*, besar energi motor induksi tiga fasa saat dihubung DOL sebesar 1474802,924 kWh dan total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dikendalikan dengan VSD sebesar 671955,259 kWh. Dapat dilihat dari hasil perhitungan energi yang dihemat saat motor memakai VSD sebesar 802847,665 kWh. Dari hasil kalkulasi tersebut dapat diketahui bahwa energi yang digunakan oleh motor induksi saat dikendalikan dengan VSD lebih kecil dari pada saat motor induksi dihubung DOL.

Pada saat motor induksi tiga fasa dihubung DOL di *Fiberline 2* motor dihubung

dengan tegangan sebesar 6600V dengan arus 50 A, dan $\cos\phi$ 0,85. Maka daya motor induksi di *Fiberline 2* sebesar:

$$P = \sqrt{3} \times 6600 \times 50 \times 0,85$$

$$P = 485.840,25 \text{ W}$$

$$P = 485,84 \text{ kW}$$

Setelah mengetahui besar daya motor induksi tiga fasa, maka besar energi dapat dikalkulasikan dengan persamaan 6. Karena terdapat 7 unit motor induksi tiga fasa besar energi listrik akan dikali 7, maka dapat dikalkulasikan besar energi listrik motor induksi tiga fasa di *Fiberline 2* sebesar:

$$W = 485.840,25 \times (24 \times 31)$$

$$W = 361.465.146 \text{ Wh}$$

$$W = 361.465,15 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{motor}} = 361.465,15 \text{ kWh} \times 7 = 2.530.256,05 \text{ kWh}$$

Pada saat motor induksi tiga fasa dikendalikan dengan VSD di *Fiberline 2* besar tegangan dan arus yang digunakan motor induksi berdasarkan data pada lampiran 4. Lalu besar daya akan dikalkulasikan menggunakan persamaan 5 dan daya yang didapat akan digunakan untuk mengkalkulasikan besar energi listrik saat motor induksi tiga fasa dikendalikan VSD di *Fiberline 2*.

Tabel 10 Tabel Total Energi Sistem VSD *Fiberline 2* Secara Teori

Motor	W (kWh)
MC Pump 1	155607,26
MC Pump 2	206176,51
MC Pump 3	225967,93
MC Pump 4	197661,09
MC Pump 5	206856,05
MC Pump 6	199709,85
MC Pump 7	226581,53
Total	1418560,22

Berdasarkan hasil dari kalkulasi energi per-hari, didapat total penggunaan energi motor induksi tiga fasa di *Fiberline 2*. Saat motor induksi tiga fasa dihubung DOL berdasarkan hasil perhitungan, total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dihubung DOL sebesar 2530256,05 kWh dan total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dikendalikan dengan VSD sebesar 1418560,22 kWh. Dapat dilihat dari hasil perhitungan energi yang dihemat saat

motor memakai VSD sebesar 1111695,83 kWh.

Dari perhitungan total energi harian di *Fiberline 2* berdasarkan hasil pengamatan lapangan, total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dihubung DOL sebesar 2000460,295 kWh dan total energi dalam 31 hari beroperasi saat motor induksi dikendalikan dengan VSD sebesar 1305916,393 kWh. Dapat dilihat dari hasil perhitungan energi yang dihemat saat motor memakai VSD sebesar 694543,902 kWh. Dari hasil kalkulasi tersebut dapat dilihat hal yang sama juga berlaku di *Fiberline 2*, jumlah energi listrik yang digunakan motor induksi tiga fasa saat dikendalikan dengan VSD di *Fiberline 2* lebih sedikit dari pada saat dihubung DOL. Berdasarkan hasil kalkulasi yang telah dilakukan, hasil kalkulasi secara teori dan hasil data aktual dari lapangan memiliki kesamaan dimana total energi ketika motor induksi tiga fasa dihubung DOL lebih besar dari pada total energi listrik ketika dikendalikan VSD

KESIMPULAN

Berdasarkan dari data-data yang telah diperoleh dan hasil kalkulasi dan analisis data dapat diambil kesimpulan. Berdasarkan hasil perhitungan total energi, motor induksi tiga fasa yang dikendalikan dengan VSD lebih sedikit jika dibandingkan dengan saat dihubung DOL. Pengurangan konsumsi energi pada motor yang dikendalikan VSD terjadi karena daya yang masuk ke motor induksi lebih kecil dari daya yang masuk saat DOL dimana daya input mendekati daya rating motor induksi tersebut. Persentase penghematan energi di *Fiberline 1* mencapai 54,35%, sedangkan di *Fiberline 2* mencapai 34,54%. Karena persentase penghematan diatas 20% maka penggunaan VSD sebagai pengendali motor induksi lebih baik. Jumlah total tarif biaya energi listrik pada motor induksi tiga fasa saat dikendalikan dengan VSD lebih kecil dari pada saat dihubung DOL. Selisih tarif energi per tahun di *Fiberline 1* sebesar Rp 9.902.917.868,672 dan di *Fiberline 2* sebesar Rp8.528.703.252,048. *Payback period* atau pengembalian modal

investasi pemasangan VSD di *Fiberline 1* yaitu selama 7, dan di *Fiberline 2* selama 13 bulan.

DAFTAR PUSTAKA

- A. de Almeida, P. Bertoldi, dan W. Leonhard (1997) 'Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives', Berlin: Springer-Verlag.
- Chapman, Stephen J (2005) 'Electric Machinery Fundamental Forth Edition' Newyork: McGraw Hill Companies
- Hadinata, N., Notosudjono, D. and Fidiansyaha, D. B. (2018) 'Energy Saving Berbasis Inverter Pada Motor Induksi Air Handling UNIT (AHU) 3 Fasa', *JOM Teknik Elektro UNPAK*, 1(1), pp. 1–13.
- Kusuma, I. (2017) 'Aplikasi inverter dalam proses konversi energi di tinjau dari aspek biaya', *Presisi*, 18(2), pp. 51–58.
- Pranata, Y., Arfianto, T. and Taryana, N. (2018) 'Analisis Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Inverter 3 Fasa', *Telka*, 4(2), pp. 91–102.
- Saidur, R., Mekhilef, S., Ali, M. B., Safari, A., & Mohammed, H. A. (2012) 'Applications of variable speed drive (VSD) in electrical motors energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*' 16(1), 543–550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.020>
- Sudirham, Sudaryatno (2002) 'Analisis Rangkaian Listrik' Bandung: ITB
- Suyanto, M. dkk. (2019) 'Kendali Putaran Motor Asinkron 3 Fasa Dengan VSD Tipe ATV312HU15N4', *Seminar Nasional TEKNOKA ke- 4*, 4(2502), pp. 89–96.
- Raharjo, M. A., & Riadi, S. (2016) 'Audit Konsumsi Energi Untuk Mengetahui Peluang Penghematan Energi Pada Gedung PT Indonesia Caps and Closures' *Jurnal PASTi*, X(3), 342–356.
- Zuhal and Zhanggischan (2004) 'Prinsip Dasar Elektroteknik'. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.