

Analisis Kemunculan Harmonisa pada *Variable Frequency Drive* dan Dampaknya terhadap Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fase

Fatur Rahman Maulana¹, Muhammad Daud^{2*}, Selamat Meliala³

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe
Jl. Batam, Kampus UNIMAL Bukit Indah, Blang Pulo, Kec. Muara Satu, Lhokseumawe 24355

¹fatur.200150075@mhs.unimal.ac.id,

^{2*}mdaud@unimal.ac.id

³selamat.meliala@unimal.ac.id

Intisari — Dalam dunia industri sering diperlukan motor induksi yang dapat dikendalikan kecepatan putarannya. Salah satu cara mengatur kecepatan motor induksi adalah dengan mengubah-ubah frekuensi listrik inputnya. Ini dilakukan dengan terlebih dahulu mengubah listrik arus bolak-balik menjadi arus searah lalu mengubahnya kembali menjadi arus bolak-balik dengan frekuensi yang berbeda-beda. Alat yang dapat digunakan untuk mengatur perubahan frekuensi saat pembangkitan kembali arus bolak-balik adalah *variable frequency drive (VFD)*. Namun masalah baru muncul dimana VFD dirangkai komponen-komponen elektronika daya yang di antaranya bersifat non linier yang dapat menimbulkan harmonisa pada sistem kelistrikan. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan analisis kemunculan harmonisa dan dampaknya terhadap pengaturan kecepatan motor induksi khususnya tiga fase. Penelitian ini dilakukan dengan metode mengambil data lapangan secara langsung lalu mensimulasikan motor induksi yang terhubung dengan VFD menggunakan Matlab Simulink 2019a. Simulasi ini berguna untuk melihat pengaruh frekuensi terhadap kecepatan motor induksi dan harmonisa yang timbul. Data-data parameter yang didapat pada pengumpulan data diinput ke model simulasi pada Simulink lalu dijalankan simulasi dan dianalisis hasilnya. Untuk meredam harmonisa yang muncul, maka dirancang filter pasif LC pada sisi output VFD. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan frekuensi pada VFD dapat mengatur kecepatan motor induksi secara signifikan tetapi penggunaan VFD juga dapat menimbulkan harmonisa. Nilai *total harmonic distortion (THD)* tegangan dari harmonisa pada frekuensi 50 Hz adalah sebesar 92,84% dan THD arus sebesar 7,17%. Setelah pemasangan filter LC pada rangkaian simulasi, maka harmonisa dapat direduksi sehingga nilai THD tegangan pada frekuensi 50 Hz menjadi sebesar 1,16% dan THD arus sebesar 4,37%. Kedua nilai THD tersebut telah sesuai dengan Standar IEEE 519-2022.

Kata kunci — Harmonisa, *variable frequency drive (VFD)*, motor induksi tiga fase, kecepatan motor induksi, *total harmonic distortion (THD)*.

Abstract — In the industrial world, induction motors are often needed whose rotation speed can be controlled. One way to regulate the speed of an induction motor is by changing the input electrical frequency. This is done by first converting alternating current electricity into direct current and then converting it back into alternating current with different frequencies. A tool that can be used to regulate frequency changes when regenerating alternating current is a *variable frequency drive (VFD)*. However, a new problem arises where the VFD is assembled with power electronic components, some of which are non-linear which can cause harmonics in the electrical system. Therefore, this research analyzes the emergence of harmonics and their impact on the speed regulation of induction motors, especially three phases. This research was carried out by taking field data directly and then simulating an induction motor connected to a VFD using Matlab Simulink 2019a. This simulation is useful for seeing the effect of frequency on the speed of an induction motor and the harmonics that arise. The parameter data obtained during data collection is input into the simulation model in Simulink, then the simulation is run and the results are analyzed. To reduce the harmonics that appear, a passive LC filter is designed on the VFD output side. The simulation results show that changing the frequency of the VFD can significantly regulate the speed of the induction motor, but the use of the VFD can also cause harmonics. The *total harmonic history (THD)* value of voltage from harmonics at a frequency of 50 Hz is 92.84% and the current THD is 7.17%. After installing an LC filter in the simulation circuit, harmonics can be reduced so that the voltage THD value at a frequency of 50 Hz becomes 1.16% and the current THD is 4.37%. Both THD values are in accordance with IEEE Standard 519-2022.

Keywords— Harmonics, *variable frequency drive (VFD)*, three-phase induction motor, speed of induction motor, *total harmonic distortion (THD)*.

I. PENDAHULUAN

Dewasa ini, sektor perindustrian di negara berkembang seperti Indonesia mengalami perkembangan yang cukup signifikan baik dari segi perindustrian skala besar maupun dari segi perindustrian skala kecil. Perkembangan dunia perindustrian tidak dapat dipisahkan dari perkembangan sistem tenaga listrik, khususnya dalam penggunaan mesin listrik. Mesin listrik ini mengambil peranan yang cukup vital dalam dunia industri. Dapat dipastikan bahwa perindustrian dan mesin listrik adalah hal yang tidak dapat dipisahkan.

PT PLN Indonesia Power Pangkalan Susu merupakan salah satu subholding perusahaan pembangkit tenaga listrik PT PLN (Persero). Kegiatan usaha utama perseroan ini terfokus pada penyediaan tenaga listrik melalui pembangkit listrik serta jasa pengoperasian dan pemeliharaan pembangkit listrik yang mengoperasikan pembangkit listrik di Indonesia. Dalam memproduksi listrik pastinya tidak terlepas dari penggunaan mesin listrik yaitu salah satunya motor listrik.

Motor listrik adalah suatu mesin listrik yang beroperasi secara elektromagnetik dengan mengubah energi listrik menjadi energi kinetik. Motor induksi tiga fase merupakan salah satu jenis motor listrik. Motor induksi tiga fase masih menjadi motor yang penggunaannya cukup populer penggunaannya. Motor induksi adalah motor arus bolak-balik yang arus medannya disalurkan oleh induksi magnetik dari stator menuju belitan rotor. Prinsip pengoperasiannya serupa dengan transformator. Motor induksi lebih baik daripada motor jenis lainnya sebab desainnya yang sederhana, murah, mudah didapat dan tidak memerlukan banyak perawatan [1].

Motor induksi biasanya beroperasi pada kecepatan yang konstan. Namun para industri mengkehendaki motor induksi tersebut dapat dikendalikan kecepatan putarannya sesuai dengan kebutuhan. Pengaturan dengan cara mengubah frekuensi ialah cara yang berpeluang menghasilkan pengaturan yang paling luas. Kecepatan motor induksi tiga fase bergantung pada jumlah kutub dan frekuensi input tegangan

[2]. Semakin kecil frekuensi maka semakin kecil juga daya yang dibutuhkan [3].

Alat yang dapat dimanfaatkan untuk mengatur kecepatan putar pada motor dengan mengatur input frekuensinya yaitu *Variable Frequency Drive (VFD)*. VFD merupakan suatu perangkat yang dapat mengubah frekuensi sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan dengan cara mengubah tegangan AC menjadi DC dan kemudian mengubah kembali menjadi tegangan AC dengan frekuensi yang variabel [4]. VFD juga berfungsi sebagai alat yang dapat menghemat penggunaan energi di suatu industri [5]. VFD ialah peralatan yang terdiri atas *rectifier*, *intermediate circuit* dan *inverter*. VFD mempunyai hampir seluruh komponen yang termasuk ke dalam beban non linear yang dapat menimbulkan harmonisa pada sistem kelistrikan [6]. Komponen non linier konverter elektronika daya menimbulkan arus harmonisa atau tegangan harmonik yang dialirkan ke dalam sistem [7]. Harmonisa adalah suatu bentuk penyimpangan gelombang sinusoidal yang berhubungan dengan arus dan tegangan dari amplitudo dan frekuensi yang berbeda [8]. Pengaruh harmonisa yang dihasilkan pada sistem satu fase atau tiga fase adalah munculnya gelombang arus dan tegangan yang rusak atau terdistorsi.

Kebutuhan akan penggunaan perangkat VFD dalam dunia industri untuk pengendalian kecepatan motor yang berkelanjutan sangat dibutuhkan dalam bidang industri dan manufaktur yang disebabkan oleh banyaknya penggunaan motor induksi [9]. Maka sebab itu, pada penelitian ini akan membahas pengaturan kecepatan motor induksi tiga fase terhadap perubahan frekuensi dan besaran *Total Harmonic Distortion (THD)* akibat harmonisa yang terjadi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa perubahan frekuensi terhadap kecepatan motor induksi, mensimulasikan melalui Matlab Simulink 2019a serta menganalisa harmonisa yang timbul akibat penggunaan VFD.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Variable Frequency Drive

Variable frequency drive (VFD) atau frekuensi konverter, inverter drive atau *adjustable speed drive* adalah suatu alat yang berguna sebagai pengontrol kecepatan motor (AC) dengan cara mengendalikan frekuensi arus yang dialirkan ke motor [10]. Frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan motor listrik maka dengan mengatur frekuensi, kecepatan motor dapat disesuaikan dengan kebutuhan atau keperluan [11].

Ada dua fungsi utama VFD, yaitu untuk mentransfer bentuk gelombang arus dari satu frekuensi ke frekuensi lainnya serta berguna mengontrol input frekuensi. Mengontrol frekuensi motor induksi dapat mempengaruhi daya yang dikonsumsi motor dimana semakin rendah frekuensinya maka semakin rendah pula daya yang dikonsumsi [3].

Metode yang dipakai untuk mengontrol kecepatan putaran adalah mengubah frekuensi stator atau mengubah jumlah kutub. Sesuai persamaan (1), N_s hanya bergantung pada frekuensi stator f dan banyak kutub p . Jika banyak kutub p konstan maka satu-satunya cara untuk mengontrol kecepatan sinkron adalah dengan mengubah frekuensi stator f [12].

$$N_s = \frac{120f}{p} \text{ (putaran per menit/rpm)} \quad (1)$$

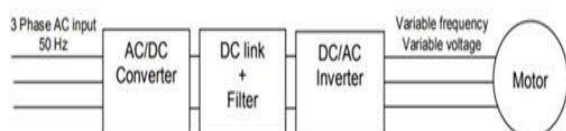
Keterangan :

N_s = kecepatan putaran sinkron medan magnet stator (rpm)

f = frekuensi sumber AC (Hz)

p = jumlah pasang kutub

B. Prinsip Kerja VFD



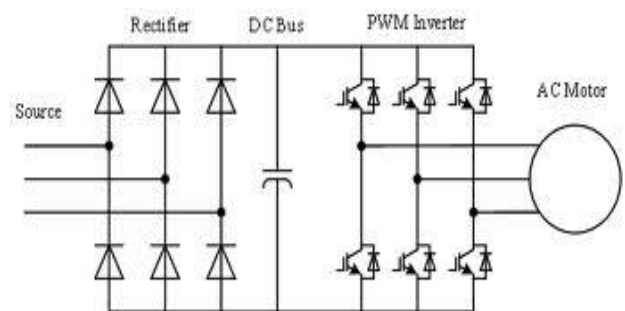
Gbr. 1 Blok diagram VFD

Prinsip kerja VFD dapat ditinjau dengan diagram blok pada Gambar 1. Diagram blok tersebut menunjukkan cara kerja VFD sebagai berikut:

1. Tegangan masukan 220/380 volt dan frekuensi 50 Hz (AC) dengan nilai tegangan dan frekuensi konstan diumpankan ke *board rectifier*. Di sini, tegangan AC diubah menjadi tegangan DC.
2. Agar tegangan DC terkompensasi, tegangan diumpankan ke rangkaian DC link. Kapasitor dan induktor terdapat pada rangkaian DC link.
3. Arus searah tersebut selanjutnya dialirkan menuju rangkaian inverter agar dikonversi menjadi arus AC dengan frekuensi yang memenuhi persyaratan. Komponen switching ialah semikonduktor aktif seperti Mosfet atau IGBT [13].

C. Konstruksi VFD

Komponen penyusun VFD ditunjukkan pada Gambar 2.



Gbr. 2 Konstruksi VFD

1. Konverter AC-DC

Pada tahap ini, VFD mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC. VFD dapat direpresentasikan sebagai enam saklar [14]. Tegangan AC disearahkan menjadi tegangan DC.

2. Bus DC

Bus DC adalah penghubung antara konverter dan inverter. Ini berfungsi untuk menghilangkan riak pada tegangan DC. Tegangan keluaran yang dihasilkan sudah rata dan tidak memiliki ripel [15].

3. Inverter DC-AC

Inverter berfungsi mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC kembali. Sebelum rangkaian penyearah, sebuah resistor dipasang secara paralel dengan kontak relai yang dikontrol, yang mengurangi arus awal dan bertindak sebagai pembatas

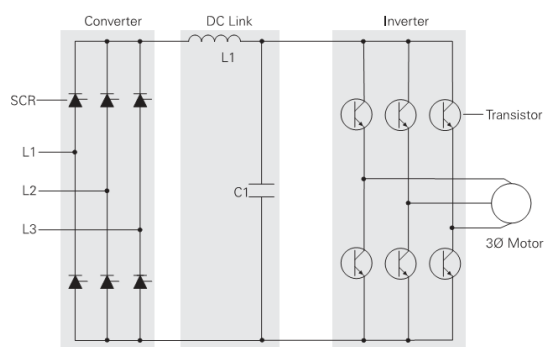
arus selama operasi awal ketika rangkaian dihubungkan ke beban [16].

D. Jenis VFD

Pada VFD terdapat tiga jenis inverter yang digunakan, yaitu:

1. Variable Voltage Inverter (VVI)

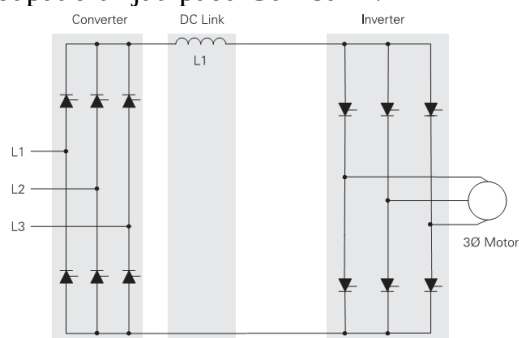
VVI merupakan teknologi inverter yang paling tua untuk VFD dan pertama yang diterima di industri. VVI juga disebut disebut sebagai "six-step drive" karena bentuk gelombang tegangan yang dikirim ke motor dalam enam langkah [1]. VVI dapat ditunjukkan pada Gambar 3.



Gbr. 3 Konstruksi VVI

2. Current Source Inverter (CSI)

CSI hampir serupa seperti VVI, namun CSI lebih sensitif kepada arus yang dialirkan ke motor, berbeda dengan VVI yang peka terhadap tegangan [1]. CSI dapat ditinjau pada Gambar 4.

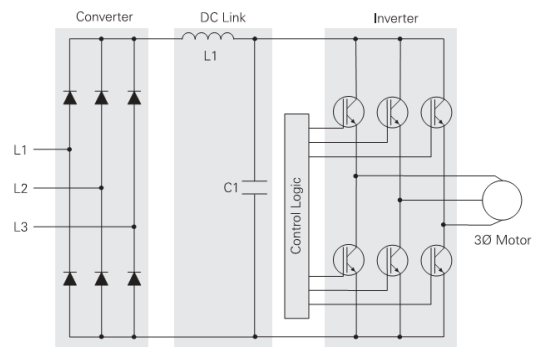


Gbr. 4 Konstruksi CSI

3. Pulse Width Modulation (PWM)

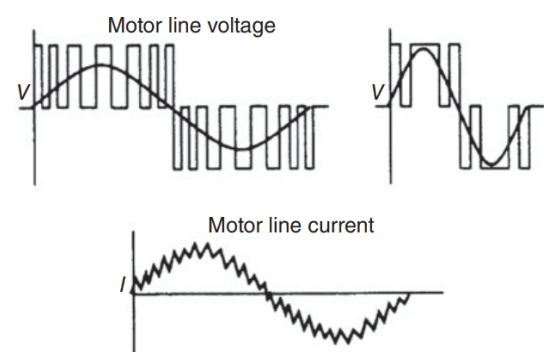
PWM adalah teknologi VFD paling baru yang memakai elektronika daya yang terbaru guna mencapai frekuensi output sesuai dengan kecepatan motor dan pengaturan tegangan yang dikehendaki. Dibandingkan jenis inverter lainnya, pengaturan dengan PWM terbukti lebih

efisien dan bertenaga [1]. Rangkaian PWM dapat ditunjukkan pada Gambar 5.



Gbr. 5 Konstruksi PWM

Pada *PWM drive* memiliki enam kombinasi berbeda yang sama namun masing-masing dinyalakan dan dimatikan berulang-ulang pada lebar pulsa yang bervariasi dan nilai frekuensi peralihan (*switching*) yang sangat tinggi (dalam kHz). Peralihan yang cepat ini menghasilkan bentuk output gelombang tegangan AC dari inverter yang lebih mendekati bentuk gelombang tegangan AC sinusoidal. Oleh sebab itu, *PWM drive* pada umumnya memiliki bentuk gelombang arus keluaran yang lebih halus seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 dan jarang terjadi *cogging* kecepatan rendah seperti yang sering terjadi pada VFD jenis VVI [17].



Gbr. 6 Gelombang tegangan dan arus PWM

E. Motor Induksi

Motor induksi merupakan tipe motor asinkron yang bekerja pada kecepatan di bawah kecepatan sinkron karena kecepatan rotor tidak cukup sinkron dengan fluks putaran stator [15]. Motor induksi banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Motor induksi yang paling sering digunakan adalah motor induksi tiga fase dan motor induksi tiga fasa. Pada dasarnya motor

induksi terdiri dari tiga bagian utama. Ketiga bagian utama tersebut antara lain stator, rotor dan celah udara

F. Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang berasal kumparan stator ke kumparan rotor. Ketika kumparan stator motor induksi tiga fase dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fase, maka kumparan stator tersebut menimbulkan medan magnet yang berputar. Garis-garis fluks gaya induksi kumparan stator berpotongan dengan kumparan rotor sehingga menimbulkan gaya gerak listrik (EMF) atau tegangan induksi. Karena konduktor rotor (kumparan) merupakan rangkaian tertutup, arus mengalir dalam kumparan rotor. Arus yang mengalir melalui kumparan rotor terletak pada garis fluks gaya yang berasal dari kumparan stator. Hal ini menyebabkan kumparan rotor mengalami gaya Lorentz sehingga memunculkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor searah dengan gerak medan induksi stator.

Konduktor pada rotor dipotong oleh medan putar stator, yang menginduksi arus dan menurut hukum Lenz, rotor juga berputar sesuai dengan medan putar stator. Putaran relative yang memiliki perbedaan antara rotor dan stator disebut slip. Dengan bertambahnya beban maka kopling motor bertambah, yang juga meningkatkan arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor bertambah. Jadi, seiring bertambahnya beban motor, putaran rotor cenderung menurun. Kumparan stator disusun dalam slot-slot pada rumah stator, yang dililitkan pada sejumlah kutub tertentu. Jumlah kutub menentukan kecepatan medan stator yang diinduksi pada rotor. Semakin banyak jumlah kutub maka semakin rendah kecepatan medan stator dan sebaliknya. Kecepatan putaran medan putar ini disebut kecepatan sinkron [18]. Besarnya kecepatan sinkron ini adalah sebagai berikut:

$$N_s = \frac{60}{2\pi} \omega_s$$

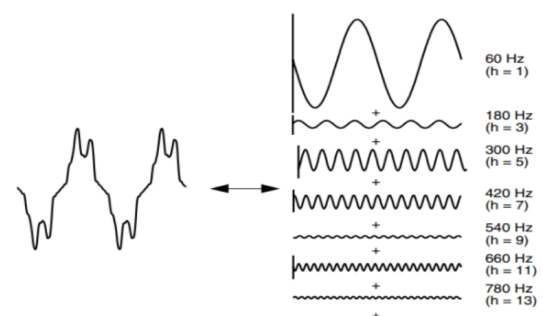
$$N_s = \frac{60}{2\pi} \left(\frac{2}{p} \right) 2\pi f$$

$$N_s = \frac{120f}{p} \text{ (putaran per menit atau rpm)} \quad (2)$$

G. Harmonisa

Harmonisa ialah distorsi gelombang berkala yang ada pada gelombang arus, tegangan, atau daya dan tersusun atas gelombang sinus yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi sumber/frekuensi fundamental, sehingga bentuknya tidak sinusoidal. [19]. Harmonisa juga bisa diartikan sebagai frekuensi gelombang distorsi yang terbentuk kelipatan dari nilai frekuensi gelombang fundamental, dengan gelombang ini menumpang pada gelombang fundamental sehingga mengakibatkan terbentuknya gelombang cacat yaitu bilangan antara gelombang fundamental dan gelombang distorsi harmonik [20]. Penggunaan beban nonlinier pada kawasan industri dan komersial juga menimbulkan permasalahan pada kualitas energi yang didistribusikan. Beban nonlinier adalah perangkat listrik yang menghasilkan gelombang non-sinusoidal ketika ditenagai oleh sumber sinusoidal [6]. Contoh beban non linier adalah inverter [21].

Sebagian besar rangkaian elektronik catu daya seperti penyearah, *Silicon Controlled Rectifier* (SCR), transistor daya, konverter daya, dan sakelar solid-state lainnya mencegat bentuk gelombang sinusoidal dari catu daya untuk mengontrol daya motor atau untuk mengubah pasokan AC sinusoidal ke DC. Rangkaian ini cenderung mengambil arus hanya pada nilai puncak suplai AC, dan dikarenakan bentuk gelombang arus switching tidak sinus, arus beban yang dihasilkan dikatakan mengandung harmonisa seperti pada Gambar 8.



Gbr. 7 Gelombang non sinusoidal akibat harmonisa

Tingkat distorsi harmonisa dapat ditinjau melalui spektrum harmonisa dengan magnitude dan sudut fase masing-masing komponen harmonisa tunggal. Besar parameter harmonik dinyatakan dalam *Total Harmonics Distortion* (THD)/total harmonisa yang terdistorsi, sebagai satuan nilai efektif dari distorsi harmonisa [22].

$$THD \text{ Tegangan} : THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (3)$$

$$THD \text{ Arus} : THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (4)$$

Persamaan di atas menentukan perbandingan nilai RMS harmonisa pada komponen terhadap komponen fundamental dalam (%). Indeks tersebut berguna untuk mengukur penyimpangan dari satu periode bentuk gelombang yang mengandung harmonisa dalam gelombang sinusoidal. Untuk gelombang sinusoidal dengan beban linier, THD frekuensi dasar ialah nol [19]. Tetapi pada beban nonlinier akan menyebabkan harmonisa kelipatan tiga ganjil [22].

H. Jenis Harmonisa

Harmonisa dapat didefinisikan sebagai rusak gelombang sinus yang timbul akibat hubungan antara bentuk gelombang sinus suatu sistem dengan gelombang lain yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari inti atau frekuensi fundamental [23]. Berdasarkan urutan atau urutannya, harmonik dibedakan menjadi harmonik ganjil dan harmonik genap. Sesuai dengan namanya, harmonik ganjil adalah harmonik ke-1, ke-3, ke-5, ke-7, ke-9, dst. Sedangkan harmonik genap adalah harmonik ke-2, ke-4, ke-6, ke-8, dst.

Dalam sistem tenaga listrik tiga fase seimbang, dengan asumsi urutan fase adalah R, S, T (a, b, c), arus dan tegangan tiap fase selalu sama dan sudut kelistrikan berbeda 120° satu sama lain. Oleh karena itu harmonisa dibagi menjadi tiga bagian menurut urutan fasenya, yaitu:

1. Harmonisa Urutan Positif

memiliki barisan fase yang sama dengan fasor aslinya, yaitu terdiri dari tiga fasor dengan amplitudo yang sama dan 120° fase yang berbeda (R, S, T atau a, b, c). Harmonisa positif ini terdiri dari harmonik ke-1, ke-4, ke-7, ke-10, dst.

2. Harmonisa Urutan Negatif

mempunyai barisan fase yang berlawanan dengan sudut aslinya, yaitu terdiri dari tiga fasor yang amplitudonya sama dan 120° fasor (R, T, S atau a, c, b) yang berbeda satu sama lain. Harmonisa negatif ini terdiri dari harmonik ke-2, ke-5, ke-8, dst.

3. Harmonisa Urutan Nol

mempunyai fasor yang amplitudonya sama dan satu fase satu sama lain (00 satu fase satu sama lain), harmonik ini sering juga disebut harmonik rangkap tiga. Harmonisa urutan nol terdiri dari harmonik ke-3, ke-6, ke-9, dst.

Berdasarkan jenis harmonik rangkaian fase di atas, dapat ditulis pada Tabel 1.

Tabel 1. Polaritas dari Komponen Harmonisa

Harmonik	Frekuensi	Urutan
1	50	+
2	100	-
3	150	0
4	200	+
5	250	-
6	300	0
7	350	+
8	400	-

I. Dampak Harmonisa

Akibat arus urutan nol akibat komponen harmonik antara lain tingginya arus netral pada sistem tiga fasa empat kawat (sisi sekunder transformator) karena arus urutan nol (*zero sequence*) pada penghantar netral adalah tiga kali arus urutan nol setiap fasa. Dampak yang diakibatkan oleh harmonisa ini pada sistem distribusi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik

Urutan	Dampak pada Sistem Distribusi
Positif	Panas
Negatif	Panas Memperlambat putaran motor
Nol	Panas Menimbulkan arus pada kawat netral

J. Standar Distorsi Harmonisa

Standar yang umum digunakan dan sangat penting adalah IEEE 519-2022 (versi sebelumnya IEEE 519-1992 dan IEEE 519-2014) sebagaimana disajikan dalam Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Standar IEEE-519-2022 (page 17) Voltage Distortion Limits

Bus Voltage at PCC	Individual Harmonic /IHDv (%)	Total Harmonic Distortion /THDv (%)
$V \leq 1.0kV$	5.0	8.0
$1 kV < V \leq 69 kV$	3.0	5.0
$69 kV < V \leq 161 kV$	1.5	2.5
$161 kV < V$	1.0	1.5

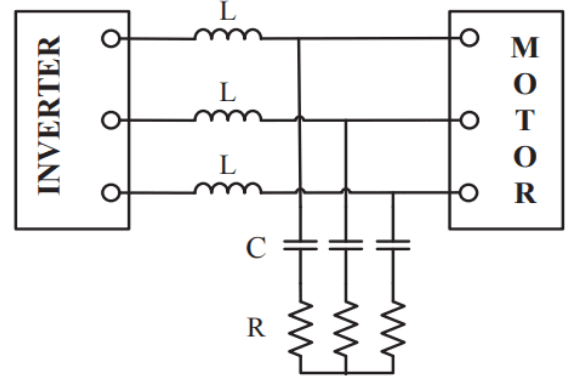
Tabel 4. Standar IEEE-519-2022 Current Distortion Limits

I_{sc}/I_L	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

K. LC Filter

Untuk meredam harmonisa dalam suatu sistem dapat diterapkan filter harmonisa berupa filter pasif dan filter aktif [24]. Filter pasif tersusun atas kapasitansi, induktansi, serta resistansi untuk mengontrol harmonisa. Salah satu teknik dalam filter pasif yang dapat dilakukan adalah menggunakan filter

pasif LC tiga fase antara keluaran terminal inverter dan masukan terminal motor induksi [25] yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gbr. 8 Filter LC antara output inverter dan input motor

Filter LC terdapat dua komponen yang digunakan yaitu induktansi dan kapasitansi. Nilai dari L dan C dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$V_{sin} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{dc} = \sqrt{2} V_{ph} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \quad (5)$$

Dimana V_{sin} adalah tegangan sumber sinusoidal, V_{dc} adalah tegangan dari DC link dan V_{ph} adalah tegangan dari rectifier, kemudian persamaan tersebut menjadi:

$$V_{sin} = V_{ph} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} = 0,95 V_{ph}$$

$$2\pi \cdot f_{sw} \cdot \frac{3L}{2} \cdot \Delta I_s = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}}$$

$$L = \frac{2V_{dc}}{\sqrt{2} \cdot 2\pi \cdot f_{sw} \cdot 3\Delta I_s} \quad (6)$$

Dengan ΔI_s merupakan arus ripel induktor yang harus berada di bawah nilai 20% dari tegangan nominal dan f_{sw} adalah frekuensi switching dari saklar daya [26].

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{2\pi^2 f_c^2 L} \quad (8)$$

$$f_c = \frac{1}{10} f_{sw} \quad (9)$$

Keterangan:

f_{res} adalah frekuensi resonansi yang harus lebih kecil dari f_{sw} [25] [27].

C adalah nilai dari kapasitansi.

f_c adalah frekuensi carrier [5].

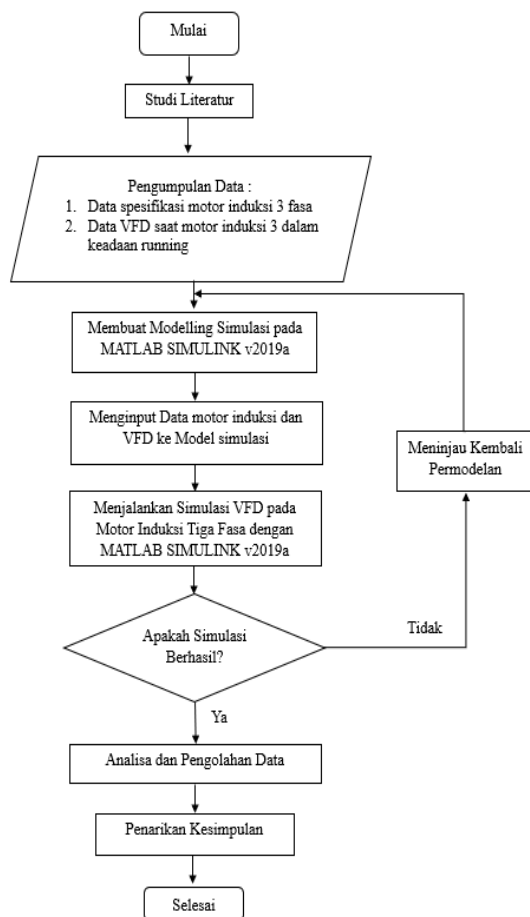
III. METODE PENELITIAN

A. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT PLN Indonesia Power PLTU Pangkalan Susu PGU Pembangkitan Sumatera Bagian Utara berlokasi di Desa Tanjung Pasir Kecamatan Pangkalan Susu, Kabupaten Langkat, Provinsi Sumatera Utara. Untuk lokasi detil pengambilan data, berlangsung pada Water Treatment Process (WTP) unit 3 yang terdapat motor induksi tiga fase yang berfungsi sebagai motor 1st High Pressure Pump A dan B pada unit 3 yang berguna untuk memompa air bertekanan tinggi dalam sistem *reverses osmosis*.

B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 10.



Gbr. 9 Diagram alir penelitian

C. Alat Penelitian

Alat yang akan digunakan dalam proses penelitian ini adalah:

1. Laptop
2. Aplikasi MATLAB versi 2019a
3. Alat tulis
4. Handphone/kamera
5. Motor induksi tiga fase
6. *Variable Frequency Drive*

D. Pengumpulan Data

Pada penelitian ini, terdapat dua data yang diambil pada PT PLN Indonesia Power Pangkalan Susu yang berupa:

1. Data Primer

Data primer merupakan data yang diperoleh dari hasil perhitungan, pengukuran, dan pengamatan langsung di PT PLN Indonesia Power Pangkalan Susu. Data diambil berupa frekuensi, arus, torsi, tegangan, kecepatan putaran motor, dan $\cos \phi$.

2. Data Sekunder

Data sekunder merupakan data yang bersumber dari sumber yang relevan dengan pembahasan tugas akhir. Adapun data sekunder dalam penelitian ini yaitu: spesifikasi motor induksi tiga fase sebagai motor 1st High Pressure Pump A dan B pada unit 3, serta spesifikasi VFD yang terhubung pada motor induksi.

E. Pengolahan Data

Setelah mendapat data yang dibutuhkan berdasarkan pengukuran di lapangan, Selanjutnya ialah membuat perancangan model pada aplikasi Matlab Simulink versi 2019a. Data tersebut kemudian dimasukkan pada model Simulink untuk menyinkronkan motor. Dari data yang telah diperoleh, selanjutnya dilakukan identifikasi data untuk mendapat nilai kecepatan medan stator, serta nilai THD arus dan tegangan.

Adapun spesifikasi motor induksi tiga fase 1st High Pressure Pump A dan B pada unit 3 sebagai berikut:

- | | |
|--------------|---------------------|
| a. Power | : 37 kW / 50 HP |
| b. Phase | : 3 phase |
| c. Rpm | : 1380 |
| d. Voltage | : 380/480 V / 50 Hz |
| e. Frequency | : 50 Hz |

- f. Efficiency : 94.7%
 g. Power Factor : 0.88
 h. Conn : Δ / Y

Adapun spesifikasi VFD yang terpasang pada otor induksi tiga fase sebagai motor 1st High Pressure Pump A dan B pada unit 3 sebagai berikut:

- a. Phase : 3 phase
 b. Degree of Protection : IP54
 c. Frame Size : R6
 d. f input : 48...63 Hz
 e. f output : 0...500 Hz
 f. In : 145 A
 g. Degree Protection : IP54

IV. HASIL & PEMBAHASAN

A. Data Hasil Pengukuran

Pengambilan data dilakukan secara langsung dan pengamatan di ruang operator. Hasil pengukuran dapat disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Data pengukuran motor induksi

F (Hz)	I (A)	T (Nm)	Vin (V)	Vout (V)	Cos Pi	Ns (rpm)
10	141,7	424	380	380	0,88	300
15	47,5	424	380	380	0,88	450
20	53,7	424	380	380	0,88	600
25	69,1	424	380	380	0,88	750
30	74,2	424	380	380	0,88	900
35	81,8	424	380	380	0,88	1050
40	89,5	424	380	380	0,88	1200
50	91,3	424	380	380	0,88	1500

Nilai Ns didapat dengan menghitung secara manual melalui persamaan (1), untuk frekuensi 10 Hz dihasilkan nilai Ns berikut:

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

$$N_s = \frac{120 \times 10}{4}$$

$$N_s = 300 \text{ Rpm}$$

untuk frekuensi 50 Hz dihasilkan nilai Ns berikut:

$$N_s = \frac{120 \times f}{P}$$

$$N_s = \frac{120 \times 50}{4}$$

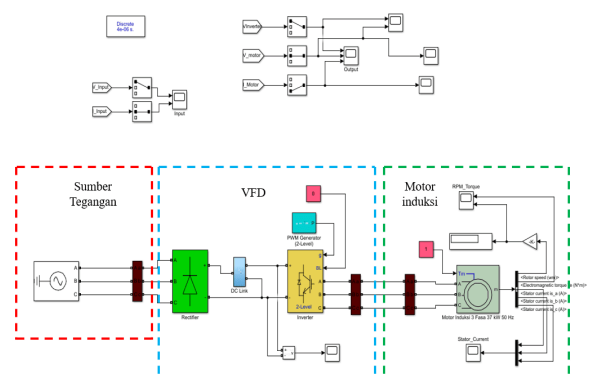
$$N_s = 1500 \text{ Rpm}$$

B. Analisa Harmonisa yang Timbul

Pada penelitian ini untuk dapat meninjau harmonisa yang mungkin timbul akibat penggunaan *variable frequency drive* (VFD) terhadap pengaturan kecepatan motor induksi tiga fase. Motor induksi yang digunakan dalam pemodelan ini adalah motor induksi 3 fase 37 kW 50 Hz 1350 Rpm. Pengukuran nilai harmonisa yang terkandung dilakukan dengan bantuan software Matlab Simulink 2019a dengan cara menyesuaikan parameter yang di lapangan. Untuk pengujian motor induksi tiga fase yang terhubung dengan VFD dilakukan dengan mengasumsikan nilai parameter sebagai berikut:

1. Tegangan Input = 400 V
2. Rectifier = Dioda
3. Induktansi (DC Link) = 0,25 mH
4. Kapasitansi (DC Link) = 11000 μ F
5. Inverter = IGBT
6. Frekuensi Switching = 10 KHz
7. Indeks Modulasi = 0,8 V

Parameter tersebut diinput ke dalam rangkaian simulasi Matlab Simulink 2019a yang telah dirancang seperti pada Gambar 11.

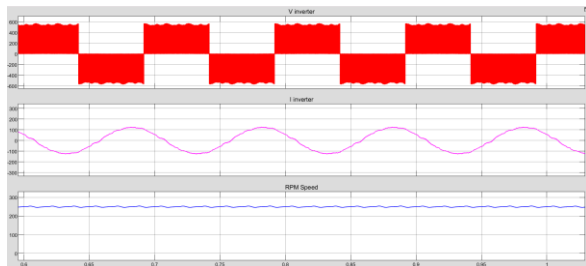


Gbr. 10 Rangkaian simulasi

Pengujian dilakukan dengan input frekuensi VFD sebesar 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, dan 50 Hz. Frekuensi yang diubah pada simulasi Matlab Simulink 2019a merupakan frekuensi sinyal referensi. Frekuensi sinyal referensi terdapat pada PWM Generator. Frekuensi sinyal referensi

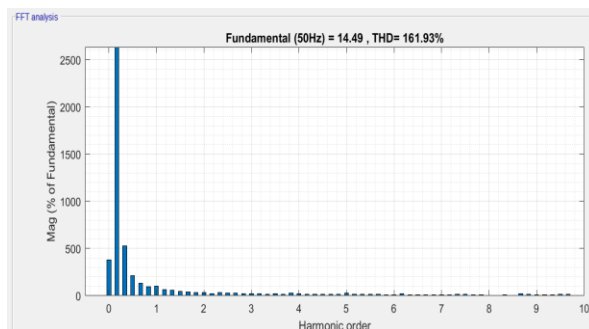
merupakan frekuensi yang diinginkan pada output sistem yang dalam artian frekuensi dari output AC yang diinginkan untuk menggerakkan motor induksi tiga fase. Frekuensi tersebut akan dilakukan pengujian melalui simulasi di Simulink yang telah kita rancang sebelumnya.

Untuk pengujian 10 Hz menghasilkan tegangan 565 V, arus sebesar 117 A, dan kecepatan motor 250 rpm yang ditunjukkan pada Gambar 2.



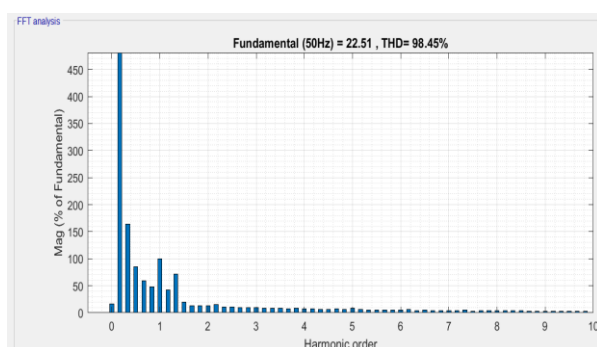
Gbr. 11 V, I, dan RPM pada Frekuensi 10 Hz

Untuk nilai THDv pada output inverter dengan frekuensi 10 Hz sebesar 161,93% seperti pada Gambar 13.



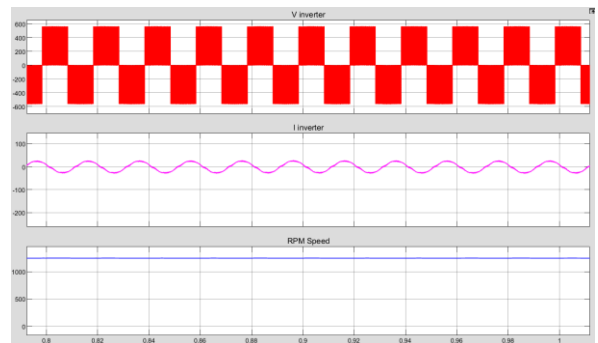
Gbr. 12 THDv inverter 10 Hz

Untuk nilai THDi pada output inverter dengan frekuensi 10 Hz sebesar 98,45% seperti pada Gambar 14.



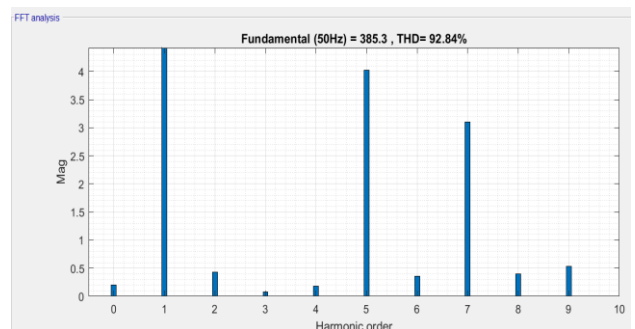
Gbr. 13 THDi inverter 10 Hz

Untuk pengujian 50 Hz menghasilkan tegangan 565 V, arus sebesar 93,3 A, dan kecepatan motor 1290 rpm yang ditunjukkan pada Gambar 15.



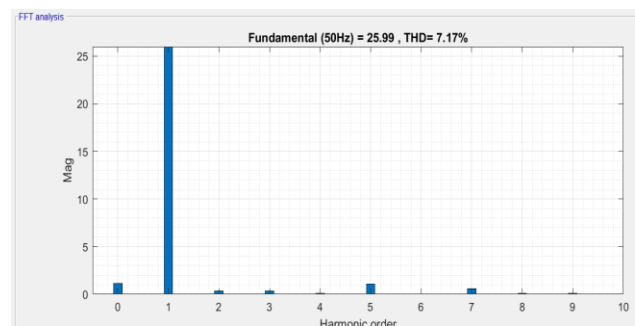
Gbr. 14 V, I, dan RPM pada Frekuensi 50 Hz

Untuk nilai THDv pada output inverter dengan frekuensi 50 Hz sebesar 92,84% seperti pada Gambar 16.



Gbr. 15 THDv inverter 50 Hz

Untuk nilai THDi pada output inverter dengan frekuensi 50 Hz sebesar 7,17% seperti pada Gambar 17.



Gbr. 16 THDi inverter 50 Hz

Adapun hasil pengujian frekuensi 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, dan 50 Hz yang diuji pada simulasi ditampilkan pada Tabel 6.

Dengan adanya *switching* harmonik elektronika daya, output dari inverter adalah tegangan AC tetapi tidak sinusoidal yang disebabkan oleh waktu *switching* yang terjadi

di inverter. Untuk itu, dipasang filter LC untuk mereduksi harmonisa yang terjadi. Untuk menghitung kebutuhan nilai L dan C digunakan persamaan (6) dan (8). Vdc pada DC Link sebesar 565 V, frekuensi switching yang digunakan sebesar 10.000 kHz, dan ripple arus yang diizinkan sebesar <10% dari arus nominal yaitu sebesar 9A.

Tabel 6. Pengujian pada setiap frekuensi

Frekuensi	THDv	THDi
10 Hz	161,93	98,45%
20 Hz	138,61%	187,20%
30 Hz	149,88%	115,45%
40 Hz	107,13%	92,39%
50 Hz	92,84%	7,17%

$$L = \frac{2 \times 565}{\sqrt{2} \times 2\pi \times 1.10^4 \times 3.9}$$

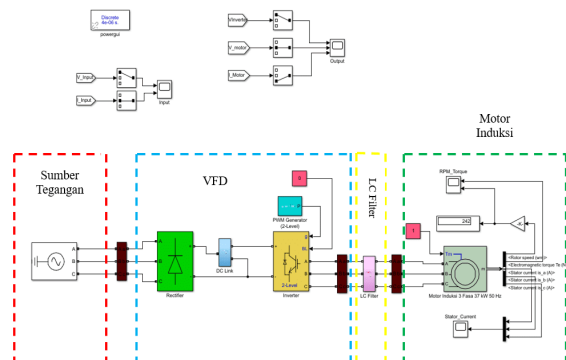
$$L = 0,47 \text{ mH}$$

Untuk nilai Fres diambil nilai 1/10 dari nilai frekuensi switching 10 kHz yaitu sebesar 1000 Hz.

$$C = \frac{1}{2\pi^2 \times 1000^2 \times 0.47.10^{-3}}$$

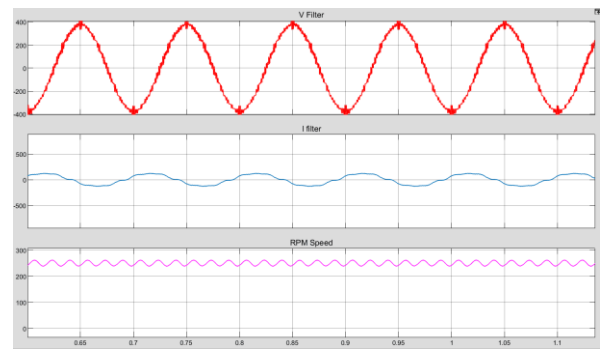
$$C = 107,78 \mu F$$

Lalu nilai L dan C disubstitusikan ke dalam simulasi yang telah dipasang dengan filter LC pada Gambar 18.



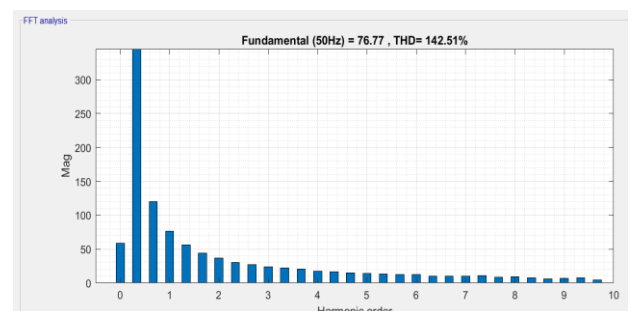
Gbr. 17 Rangkaian simulasi setelah dipasang filter LC

Pengujian dilakukan dengan input frekuensi VFD sebesar 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, dan 50 Hz. Untuk pengujian 10 Hz output filter menghasilkan tegangan 400 V, arus sebesar 105 A, dan kecepatan motor 260 rpm yang ditunjukkan pada Gambar 19.



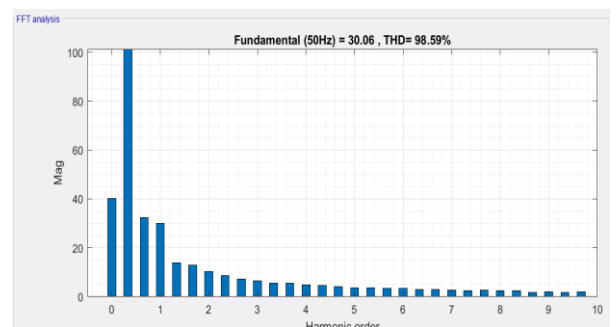
Gbr. 18 V, I, dan RPM motor output filter (10 Hz)

Untuk nilai THDv pada output filter dengan frekuensi 10 Hz sebesar 142,51% seperti pada Gambar 20.



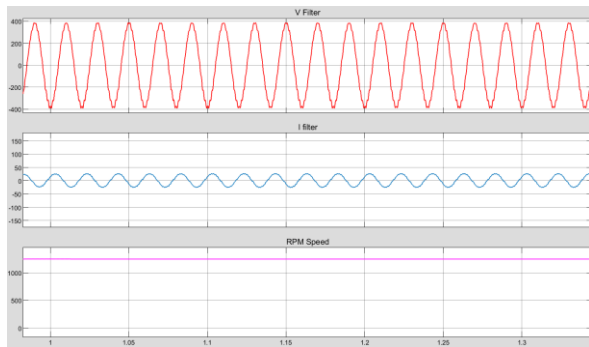
Gbr. 19 THDv output filter frekuensi 10 Hz

Untuk nilai THDi pada output filter dengan frekuensi 10 Hz sebesar 98,59% seperti pada Gambar 21.



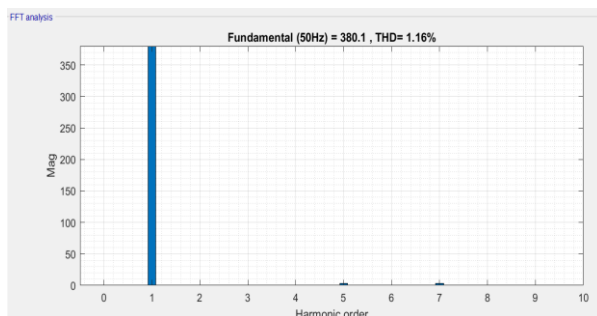
Gbr. 20 THDv output filter frekuensi 10 Hz

Untuk pengujian 50 Hz menghasilkan tegangan 400 V, arus sebesar 93 A, dan kecepatan motor 1290 rpm yang ditunjukkan pada Gambar 22.



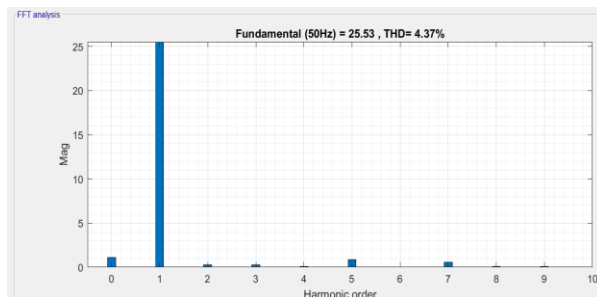
Gbr. 21 V, I, dan RPM motor output filter (50 Hz)

Untuk nilai THDv pada output filter dengan frekuensi 50 Hz sebesar 1,16% seperti pada Gambar 23.



Gbr. 22 THDv output filter frekuensi 50 Hz

Untuk nilai THDi pada output filter dengan frekuensi 50 Hz sebesar 4,37% seperti pada Gambar 24.



Gbr. 23 THDv output filter frekuensi 50 Hz

Adapun hasil pengujian frekuensi 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz, 40 Hz, dan 50 Hz yang diuji pada simulasi dengan output filter LC ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Pengujian pada setiap frekuensi

Frekuensi	THDv	THDi
10 Hz	142,51%	98,59%
20 Hz	146,23%	125,74%
30 Hz	91,66%	110,12%
40 Hz	69,85%	45,40%
50 Hz	1,16%	4,37%

C. Hubungan Frekuensi & Putaran Motor

Pada penelitian ini terdapat dua cara untuk menentukan RPM; 1) menggunakan pers. (1)/menggunakan perhitungan manual. 2)meninjau hasil simulasi pada Simulink Matlab 2019a. Adapun untuk tabel komparasi antara perhitungan manual dan hasil simulasi dapat disajikan pada Tabel 8.

Tabel. 8 Perbandingan hasil perhitungan manual dan hasil simulasi

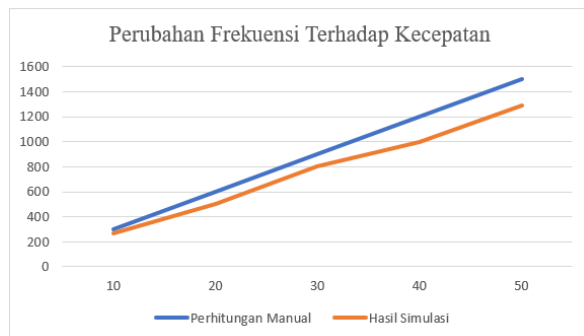
Persamaan (1)		Hasil Simulasi	
Frekuensi	RPM	Frekuensi	RPM
10	300	10	265
20	600	20	500
30	900	30	790
40	1200	40	1000
50	1500	50	1250

Terdapat perbedaan nilai RPM antar perhitungan manual dan perhitungan hasil simulasi. Hal ini terjadi karena perhitungan manual hanya melakukan perhitungan murni tanpa adanya pengaruh yang lain. Sehingga angka pada perhitungan manual merupakan angka yang konstan tanpa adanya pengaruh lain. Sedangkan pada simulasi di Matlab Simulink 2019a terdapat faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi kecepatan putar suatu motor induksi. Faktor-faktor tersebut meliputi parameter dinamis seperti kerugian inti besi, kerugian mekanis (gesekan), adanya rugi tegangan pada kabel, slip, serta adanya efek harmonisa yang dapat mengganggu kecepatan putar motor induksi. Pada perhitungan manual juga tidak memperhatikan nameplate pada motor induksi. Pada perhitungan manual mencapai nilai 1500 Rpm pada frekuensi 50 Hz sedangkan pada simulasi memperhitungkan nameplate motor induksi yaitu maksimum RPM yaitu 1350 rpm. Adapun error antara nilai RPM nameplate dan RPM simulasi sebesar

$$\text{error} = \frac{1350-1290}{1350} \times 100\% = 4,4\%$$

Ini merupakan error yang disebabkan perbedaan nilai parameter yang digunakan pada simulasi Matlab Simulink 2019a dan keadaan di lapangan. Selain itu perlu diingat bahwa frekuensi input maksimum dari motor induksi tiga fase ini adalah 50 Hz sehingga tidak memungkinkan untuk menambah

frekuensi di atas 50 Hz. Karena kecepatan putar motor berbanding lurus dengan frekuensi, maka perubahan dari frekuensi berdampak langsung pada kecepatan putarnya. Dapat kita lihat pada Tabel 8 seiring dengan bertambahnya frekuensi maka kecepatan rotor juga ikut bertambah secara signifikan. Grafik perubahan frekuensi terhadap kecepatan putar motor dapat dilihat pada Gambar 25.



Gbr. 24 Grafik perubahan frekuensi terhadap kecepatan putar

V. KESIMPULAN

Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa perubahan frekuensi pada VFD dapat mengatur kecepatan motor induksi tiga fase secara signifikan, dimana semakin tinggi frekuensi maka semakin tinggi pula kecepatan motor induksi. Namun, penggunaan VFD juga dapat menimbulkan masalah baru yaitu munculnya harmonisa. Nilai THDv dari harmonisa yang muncul adalah sebesar 92,84% dan nilai THDi sebesar 7,17%. Adanya harmonisa ini menyebabkan gelombang arus dan tegangan terdistorsi sehingga gelombangnya tidak berupa sinusoidal tunggal. Untuk mengurangi harmonisa ini maka dipasang filter pasif LC. Setelah pemasangan Filter LC, bentuk gelombang tegangan output menuju motor induksi tiga fase sudah hampir mendekati bentuk sinusoidal murni dengan nilai THDv sebesar 1,16% dan nilai THDi sebesar 4,37%. Sehingga nilai THDv dan THDi tersebut telah sesuai dengan standar IEEE 519-2022.

REFERENSI

- [1] A. Multi and E. Febryane, "Penggunaan Variable Speed Drive pada Motor Induksi Untuk Penghematan Konsumsi Energi Listrik," *Sainstech J. Penelit. dan Pengkaj. Sains dan Teknol.*, vol. 22, no. 2, pp. 30–37, 2012, doi: 10.37277/stch.v22i2.609.
- [2] Hironimus, L. Sartika, and A. Muis Prasetya, "Analisis Daya Motor Induksi 3 Fasa Penggerak Conveyor 06 di PT. Mitrabara Adiperdana," *Electr. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 18, no. 02, pp. 154–160, 2024.
- [3] Y. Pranata, T. Arfianto, and N. Taryana, "Analisis Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Inverter 3 Fasa," *TELKA - Telekomun. Elektron. Komputasi dan Kontrol*, vol. 4, no. 2, pp. 91–102, 2018, doi: 10.15575/telka.v4n2.91-102.
- [4] E. S. Nasution and A. Hasibuan, "Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa dengan Merubah Frekuensi Menggunakan Inverter ALTIVAR 12P," *J. Sist. Inf.*, vol. 2, no. 1, pp. 25–34, 2018, doi: 10.29103/sisfo.v2i1.1001.
- [5] S. Meliala, "Implementasi on Grid Inverter Pada Instalasi Rumah Tangga untuk Masyarakat Pedesaan dalam Rangka Antisipasi Krisis Energi Listrik," *J. Litek*, vol. 17, no. 2, pp. 47–56, 2020.
- [6] E. Zondra, Nofriandi, and M. P. Halilintar, "Analisis Pemasangan Filter Pasif Untuk Mereduksi Harmonisa Variable Speed Drive di PT. IKPP Perawang," vol. 8, no. 1, pp. 1–12, 2023, doi: 10.31849/sainetin.v8i1.10030.
- [7] Z. Huda, N. Purwasih, D. Permata, and D. Despa, "Analisis Harmonisa pada Sistem AC Microgrid Terhubung ke Grid," *Electrician*, vol. 15, no. 2, pp. 153–159, 2021, doi: 10.23960/elc.v15n2.2201.
- [8] Willy Prasetyadi, Rony Seto Wibowo, and Ontoseno Penangsang, "Evaluasi Harmonisa dan Perencanaan Filter Pasif pada Sisi Tegangan 20 kV Akibat Penambahan Beban pada Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tuban," *J. Tek. ITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [9] Syufrijal and R. Monantun, *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*, vol. 1. 2017.
- [10] Atmam, A. Tanjung, and Zulfahri, "Analisis Penggunaan Energi Listrik Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Variable Speed Drive (VFD)," *J. Sain, Energi, Teknol. Ind.*, vol. 2, no. 2, pp. 52–59, 2018.
- [11] Y. Y. Garud, S. R. Gole, R. T. Jadhav, and S. U. Deoghare, "A Study on Variable Frequency Drive and It's Application," *Int. J.*

- Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 3079–3084, 2016, doi: 10.15680/IJIRSET.2016.0503056.
- [12] A. Kale, N. R. Kamdi, P. Kale, and A. A. Yeotikar, “A Review Paper on Variable Frequency Drive,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 1281–1284, 2017.
- [13] Dedi Noviadri, E. Zondra, and A. Atmam, “Evaluasi Kinerja Motor Coal Feeder Di PLTU Tenayan Raya Terhadap Pengaruh Perubahan Frekuensi,” *J. Tek.*, vol. 16, no. 1, pp. 88–95, 2022, doi: 10.31849/teknik.v16i1.6987.
- [14] Mörsaregatan, “What is a VFD (Variable Frequency Drive) and where is it used?,” *Emotron dedicated drive*, 2024.
- [15] A. Aripriharta, “Kendali Motor Induksi Menggunakan Variable Speed Drive,” *J. Kaji. Tek. Elektro*, vol. 8, no. 1, pp. 1–6, 2023, doi: 10.52447/jkte.v8i1.6567.
- [16] I. Nugrahanto, “Perancangan Variable Frequency Drive (VFD) Satu Phasa dengan Menggunakan Metode Sinusoida Pulse Width Modulation Berbasis Mikrokontroler,” *E-Link J. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 17, no. 2, p. 32, 2022, doi: 10.30587/e-link.v17i2.4497.
- [17] T. H. Blair, *Energy Production Systems Engineering*. John Wiley & Sons, Inc, 2017. doi: 10.1002/9781119238041.ch18.
- [18] I. N. Bagia and I. M. Parsa, *Motor-Motor Listrik*, 1st ed., no. April. Kupang: CV. Rasi Terbit, 2018.
- [19] P. Harahap and B. Oktrialdi, “Harmonisa in defibrillator equipment (DC Shock)using simulink Matlab,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 821, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/821/1/012025.
- [20] R. Kurniawan, M. Daud, and A. Hasibuan, “Impact of Intermittent Renewable Energy Generations Penetration on Harmonics in Microgrid Distribution Networks,” *Proceeding - ELTICOM 2022 6th Int. Conf. Electr. Telecommun. Comput. Eng.* 2022, no. February, pp. 30–37, 2022, doi: 10.1109/ELTICOM57747.2022.10038200.
- [21] A. Marchtindra, Atmam, and E. Zondra, “Analisis Harmonisa Menggunakan Filter Pasif pada Variable Speed Drive (VSD) dengan Beban Motor Electrical Submersible Pump (ESP) di PT. Chevron Pasific Indonesia (CPI),” *J. Tek.*, vol. 15, no. 1, pp. 9–17, 2021, doi: 10.31849/teknik.v14i2.4029.
- [22] E. Zondra, A. Tanjung, and . A., “Pengaruh Tegangan Sumber dan Beban Terhadap Tingkat Harmonisa ada Motor Induksi Tiga Fase,” *SainETIn*, vol. 1, no. 1, pp. 17–24, 2017, doi: 10.31849/sainetin.v1i1.167.
- [23] N. Soedjarwanto, S. Alam, E. K. Sari, Anizar, and G. A. R.K., “Rancang Bangun Multilevel Inverter dengan Filter Pasif L-C-L dan Teknologi IoT Untuk Memantau Perubahan Kecepatan Motor Induksi Satu Fasa,” *Electr. J. Rekayasa dan Teknol. Elektro*, vol. 18, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: 10.23960/elc.v18n1.2489.
- [24] S. Meliala, “Pengaruh Filter Pasif Single Tuned untuk Minimalisir Harmonisa Akibat Kontaminasi Arus Harmonisa pada Distribusi Tegangan Rendah Tiga Fase PT.PLN Lhokseumawe,” *Issn*, vol. 2, no. 3, pp. 44–53, 2017.
- [25] J. K. Steinke, “Use of an LC filter to Achieve a Motor-friendly Performance of the PWM Voltage Source Inverter,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 14, no. 3, pp. 649–654, 1999, doi: 10.1109/60.790930.
- [26] A. A. Al-Abduallah, A. Iqbal, A. A. Al Hamadi, K. Alawi, and M. Saleh, “Five-phase induction motor drive system with inverter output LC filter,” *7th IEEE GCC Conf. Exhib. GCC 2013*, pp. 153–158, 2013, doi: 10.1109/IEEEGCC.2013.6705767.
- [27] M. H. Rashid, M. F. Rahman, D. Patterson, A. Cheok, and R. Betz, *Power Electronics Handbook Third Edition*. Butterworth-Heinemann, 2011. doi: 10.1016/B978-0-323-99216-9.00042-1.