

SKRIPSI

**STUDI REDUKSI HARMONISA MOTOR INDUKSI TIGA
FASA AKIBAT PENGGUNAAN *VARIABLE FREQUENCY
DRIVE* (VFD) PADA *FAN COOLER* PT. SEMEN TONASA
UNIT V**

Disusun dan diajukan oleh:

**SRIKANDY ANUGHRAH
D041 20 1065**



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

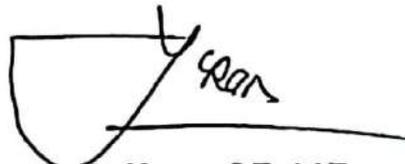
**STUDI REDUKSI HARMONISA MOTOR INDUKSI TIGA FASA AKIBAT
PENGUNAAN *VARIABLE FREQUENCY DRIVE* (VFD) PADA *FAN*
COOLER PT. SEMEN TONASA UNIT V**

Disusun dan diajukan oleh

**Srikandy Anugrah
D041201065**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 20 November 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.
NIP. 197504042000121001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Endang Muzak A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Srikandy Anugrah

NIM : D041201065

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**STUDI REDUKSI HARMONISA MOTOR INDUKSI TIGA FASA AKIBAT
PENGUNAAN *VARIABLE FREQUENCY DRIVE* (VFD) PADA *FAN
COOLER* PT. SEMEN TONASA UNIT V**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Segala informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitnya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 November 2024

Yang Menyatakan,


Srikandy Anugrah

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini berjudul “Studi Reduksi Harmonisa Motor Induksi Tiga Fasa Akibat Penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) Pada *Fan Cooler* PT. Semen Tonasa Unit V”.

Penyusunan skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Penulisan skripsi ini memerlukan proses yang panjang dan penuh tantangan, dan tidak terlepas dari doa, bimbingan, dukungan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyusunan dan penyelesaian skripsi ini, antara lain :

1. Kedua orang tua tercinta, **Ns. Pirman, S.Kep., M.M.** dan **Nurjanna** yang telah menjadi sumber kekuatan, motivasi, dan inspirasi terbesar dalam hidup penulis. Terima kasih untuk segala pengorbanan, kasih sayang, dukungan yang tiada hentinya selama proses perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini, serta doa yang tulus dari mereka menjadi dorongan utama bagi penulis untuk tetap berusaha dan memberikan yang terbaik.
2. Kedua saudara penulis, **Amel** dan **Asa**, serta seluruh keluarga besar penulis yang senantiasa memberi kehangatan, semangat, serta perhatian yang menjadi kekuatan tersendiri yang sangat berarti dalam hidup penulis.
3. Ketua Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Bapak **Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.**
4. Bapak **Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.** selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan banyak waktu, tenaga, dan pikiran untuk membimbing serta mengarahkan penulis hingga penyelesaian skripsi ini. Terima kasih untuk

segala ilmu, doa, serta dukungan yang senantiasa diberikan kepada penulis.

5. Bapak **Prof Dr. Eng. Ir. Syafaruddin, S.T., M.Eng., IPU.** dan Ibu **Ir. Hasniaty A, S.T., M.T., Ph.D.** selaku dosen penguji yang telah menyempatkan waktu untuk hadir selama seminar dan memberikan kritik, saran, serta arahan dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Seluruh **Dosen dan Staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin** yang telah mengajar, mendidik, dan memberikan dukungan selama masa perkuliahan sampai penyelesaian skripsi ini.
7. Seluruh pegawai dan **Staf PT. Semen Tonasa**, terkhusus Manager of Electrical Network Maintenance, Bapak **Muhammad Rusdianto H.N, ST., M.T.** atas segala ilmu, pengalaman, keikhlasan dan kesempatan yang telah diberikan selama proses penelitian berlangsung.
8. Sahabat sejati penulis, **Mia, Lala, Tiwi, dan Isna** yang telah memberikan arti persahabatan yang sebenarnya, menjadi saudara tidak sedarah sejak kecil, selalu ada di setiap fase hidup penulis, tumbuh bersama penulis, berbagi suka dan duka, mimpi serta harapan.
9. Pemilik **NIM 062** yang selalu ada dan senantiasa menjadi pendengar yang baik bagi penulis. Terima kasih atas kesabaran yang begitu besar dalam menghadapi penulis dan menjadi bagian dari perjalanan penulis dalam masa perkuliahan dan penyelesaian skripsi ini.
10. Teman seperjuangan kuliah di tanah perantauan, **Faizah, Inna, Isti, Rani dan Muli**, yang selalu baik sekaligus menjadi keluarga bagi penulis. Terima kasih atas segala bantuan, canda, dan tawa yang senantiasa mengisi hari-hari penulis.
11. Teman-teman **Teknik Elektro 2020 (PROCEZ20R)** yang telah kebersamai penulis mulai dari awal perkuliahan hingga penyelesaian skripsi ini. Terima kasih atas segala ilmu, bantuan, dan momen kebersamaan yang pernah dilalui.
12. Teman-teman **Konsentrasi Energi** atas semangat yang tidak pernah padam, melewati lika-liku kehidupan "anak energi" yang mempunyai

kenangan tersendiri, terkhusus drama TTL. Terima kasih untuk tetap bertahan hingga semua proses perkuliahan selesai.

13. Teman-teman **Lab Riset Elektronika Daya** yang telah bekerja sama dalam menyelesaikan proyek "*capstone design*". Terima kasih telah berjuang, berbagi informasi, berdiskusi, saling membantu, dan saling mengingatkan.
14. Teman-teman **SRE Unhas** periode 2021 hingga 2023 yang telah menjadi tempat bertukar pikiran, berbagi ide-ide kreatif, dan diskusi yang produktif. Terima kasih atas kepercayaan, kerja sama dan pengalaman yang luar biasa bagi penulis.
15. Teman-teman **PMR 018** yang selalu punya cara untuk memberikan kebahagiaan bagi penulis. Terima kasih untuk saling mengingatkan dan berbagi kebahagiaan.
16. Teman-teman KKN Gel 110 Posko 7, Kelurahan Ujung Baru Parepare, **Fika, Caca, Fira, Luna, Ose, Aidil, dan Iccang** yang telah mewarnai masa 45 hari itu. Terima kasih telah berbagi banyak hal kepada penulis baik itu suka dan duka.
17. Diri saya sendiri, **Srikandy Anugrah**, yang telah berjuang keras hingga saat ini, terima kasih untuk tidak menyerah melewati banyak tantangan. Semoga ini menjadi awal yang baik untuk banyak hal yang lebih baik lagi ke depannya.
18. Seluruh pihak yang terlibat yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu dan mendukung penulis hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa terdapat kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, kritik, saran, dan arahan dari berbagai pihak sangat diharapkan untuk perbaikan dan pengembangan lebih lanjut. Penulis berharap bahwa penelitian ini dapat bermanfaat baik itu bagi penulis maupun bagi para pembaca. Akhir kata semoga skripsi ini dapat menjadi salah satu kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

ABSTRAK

SRIKANDY ANUGHRAH. *Studi Reduksi Harmonisa Motor Induksi Tiga Fasa Akibat Penggunaan Variable Frequency Drive (VFD) Pada Fan Cooler PT. Semen Tonasa Unit V (dibimbing oleh Yusran)*

PT. Semen Tonasa yang merupakan produsen semen terbesar di Kawasan Timur Indonesia banyak menggunakan motor induksi tiga fasa sebagai alat untuk proses produksi. Untuk mengendalikan kecepatan putaran motor-motor induksi tersebut digunakan *variable frequency drive* (VFD). VFD ini memiliki sebagian besar komponen elektronika yang dapat dikategorikan sebagai beban non linear yang akan menimbulkan harmonisa pada sistem kelistrikan. Pada penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi kandungan harmonisa pada motor induksi tiga fasa akibat penggunaan *variable frequency drive* (VFD) di *Fan Cooler* PT. Semen Tonasa Unit V dan cara mereduksinya dengan menggunakan filter pasif jenis *single tuned*. Metode yang digunakan yaitu dengan melakukan pemodelan jaringan distribusi kemudian melakukan simulasi harmonisa. Hasil simulasi menunjukkan kandungan harmonisa tegangan (THDv) dan harmonisa arus (THDi) di ketiga fasa sumber harmonisa (R, S, dan T) pada masing-masing bus LV03 dan LV04 berada di atas standar IEEE 519-2014 dengan batas sebesar 8% untuk THDv dan 5% untuk THDi. Dengan pemasangan *single tuned filter*, harmonisa dapat direduksi sehingga nilainya berada di bawah standar IEEE 519-2014 di masing-masing bus LV03 dan bus LV04 dengan nilai THDv setelah pemasangan filter sebesar 1,54% dan 1,71% (sumber fasa R), 1,49% dan 1,60% (sumber fasa S), serta 1,53% dan 1,71% (sumber fasa T). Dan nilai THDi setelah pemasangan filter sebesar 2,01% dan 2,68% (sumber fasa R), 1,77% dan 2,40% (sumber fasa S), serta 2,53% dan 3,26% (sumber fasa T).

Kata Kunci: Motor Induksi Tiga Fasa, *Variable Frequency Drive* (VFD), Harmonisa, *Single Tuned Filter*

ABSTRACT

SRIKANDY ANUGHRAH. *Harmonic Reduction Study of Three-Phase Induction Motor Due to the Use of Variable Frequency Drive (VFD) on Fan Cooler PT. Semen Tonasa Unit V* (supervised by Yusran)

PT. Semen Tonasa, which is the largest cement producer in Eastern Indonesia, uses many three-phase induction motors as a tool for the production process. To control the rotation speed of these induction motors, a variable frequency drive (VFD) is used. This VFD has most of the electronic components that can be categorized as non-linear loads that will cause harmonics in the electrical system. This research aims to investigate the harmonic content of the three-phase induction motor due to the use of variable frequency drive (VFD) in the Fan Cooler PT Semen Tonasa Unit V and how to reduce it by using a single tuned passive filter. The method used is by modeling the distribution network and then simulating harmonics. The simulation results show that the content of voltage harmonics (THD_v) and current harmonics (THD_i) in all three phases of the harmonic source (R, S, and T) on each LV03 and LV04 bus is above the IEEE 519-2014 standard with a limit of 8% for THD_v and 5% for THD_i. With the installation of a single tuned filter, harmonics can be reduced so that the value is below the IEEE 519-2014 standard on each LV03 bus and LV04 bus with THD_v values after filter installation of 1.54% and 1.71% (R phase source), 1.49% and 1.60% (S phase source), and 1.53% and 1.71% (T phase source). And the THD_i value after filter installation is 2.01% and 2.68% (phase source R), 1.77% and 2.40% (phase source S), and 2.53% and 3.26% (phase source T).

Keywords: Three Phase Induction Motor, Variable Frequency Drive (VFD), Harmonics, Single Tuned Filter

DAFTAR ISI

| | |
|--|-------------|
| LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI | i |
| PERNYATAAN KEASLIAN..... | ii |
| KATA PENGANTAR..... | iii |
| ABSTRAK | vi |
| ABSTRACT | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR TABEL | x |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiv |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah..... | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.5 Ruang Lingkup | 4 |
| 1.6 Sistematika Penulisan | 4 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 6 |
| 2.1 <i>Fan</i> pada <i>Cooler</i> | 6 |
| 2.2 Motor Induksi Tiga Fasa..... | 8 |
| 2.2.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa | 8 |
| 2.2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa | 11 |
| 2.2.3 Slip pada Motor Induksi | 13 |
| 2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi..... | 14 |
| 2.3 <i>Variable Frequency Drive</i> (VFD) | 14 |
| 2.3.1 Prinsip Kerja <i>Variable Frequency Drive</i> (VFD) | 16 |
| 2.4 Harmonisa..... | 16 |
| 2.4.1 Jenis Harmonisa | 18 |
| 2.4.2 Standardisasi Harmonisa | 19 |
| 2.4.3 Indeks Harmonisa..... | 21 |
| 2.4.4 Dampak Harmonisa..... | 22 |
| 2.4.5 Filter Harmonisa..... | 23 |
| 2.5 ETAP (<i>Electric Transient and Analysis Program</i>)..... | 26 |
| 2.6 Penelitian Terdahulu yang Terkait | 27 |

| | |
|--|-----------|
| BAB III METODE PENELITIAN | 31 |
| 3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian | 31 |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian..... | 31 |
| 3.3 Teknik Pengumpulan Data..... | 32 |
| 3.4 Teknik Pengukuran | 32 |
| 3.5 Algoritma Simulasi Harmonisa..... | 36 |
| 3.6 Diagram Alir Penelitian | 38 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 40 |
| 4.1 Sistem Kelistrikan <i>Cooler</i> PT. Semen Tonasa Unit V | 40 |
| 4.2 Pemodelan <i>Single Line Diagram Fan Cooler</i> PT. Semen Tonasa Unit V | 42 |
| 4.2.1 Simulasi Aliran Daya..... | 43 |
| 4.3 Simulasi Distorsi Harmonisa | 43 |
| 4.3.1 Distorsi Harmonisa Sumber Fasa R | 44 |
| 4.3.2 Distorsi Harmonisa Sumber Fasa S..... | 49 |
| 4.3.3 Distorsi Harmonisa Sumber Fasa T..... | 54 |
| 4.4 Perancangan Filter Pasif | 59 |
| 4.4.1 <i>Single Tuned Filter</i> untuk Mereduksi THD Tegangan dan THD Arus.... | 62 |
| 4.5 Simulasi Distorsi Harmonisa dengan Pemasangan Filter Pasif..... | 66 |
| 4.5.1 Distorsi Harmonisa Sumber Fasa R dengan Pemasangan Filter Pasif | 67 |
| 4.5.2 Distorsi Harmonisa Sumber Fasa S dengan Pemasangan Filter Pasif..... | 74 |
| 4.5.3 Distorsi Harmonisa Sumber Fasa T dengan Pemasangan Filter Pasif | 81 |
| 4.5.4 Simulasi Aliran Daya Setelah Pemasangan Filter Pasif | 88 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 90 |
| 5.1 Kesimpulan | 90 |
| 5.2 Saran | 90 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 92 |
| LAMPIRAN..... | 94 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 1 <i>Voltage distortion limits</i> | 19 |
| Tabel 2 <i>Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV</i> | 20 |
| Tabel 3 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan | 29 |
| Tabel 4 Uraian beban motor dan VFD pada TR-1 | 41 |
| Tabel 5 Uraian beban motor dan VFD pada TR-2 | 41 |
| Tabel 6 Hasil simulasi aliran daya <i>fan cooler</i> PT. Semen Tonasa Unit V | 43 |
| Tabel 7 Hasil perhitungan rasio dari masing-masing bus | 45 |
| Tabel 8 Hasil simulasi THD sumber fasa R | 45 |
| Tabel 9 Hasil simulasi IHD sumber fasa R | 46 |
| Tabel 10 Hasil simulasi THD sumber fasa S | 50 |
| Tabel 11 Hasil simulasi IHD sumber fasa S | 51 |
| Tabel 12 Hasil simulasi THD sumber fasa T | 55 |
| Tabel 13 Hasil simulasi IHD sumber fasa T | 56 |
| Tabel 14 Nilai IHD setiap orde yang melebihi standar | 60 |
| Tabel 15 Spesifikasi nilai komponen <i>single tuned filter</i> | 66 |
| Tabel 16 Perbandingan hasil simulasi THD sumber fasa R sebelum dan setelah pemasangan filter | 68 |
| Tabel 17 Hasil simulasi IHD sumber fasa R setelah pemasangan filter | 69 |
| Tabel 19 Perbandingan hasil simulasi THD sumber fasa S sebelum dan setelah pemasangan filter | 75 |
| Tabel 19 Hasil simulasi IHD sumber fasa S setelah pemasangan filter | 76 |
| Tabel 20 Perbandingan hasil simulasi THD sumber fasa T sebelum dan setelah pemasangan filter | 82 |
| Tabel 21 Hasil simulasi IHD sumber fasa T setelah pemasangan filter | 83 |
| Tabel 22 Hasil simulasi aliran daya <i>fan cooler</i> PT. Semen Tonasa Unit V setelah pemasangan filter | 89 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 1 <i>Clinker cooler</i> | 6 |
| Gambar 2 Skema <i>grate cooler</i> | 6 |
| Gambar 3 <i>Cooling fan</i> | 7 |
| Gambar 4 Bentuk fisik motor induksi tiga fasa | 8 |
| Gambar 5 Motor induksi tiga fasa di industri | 8 |
| Gambar 6 Stator motor induksi tiga fasa..... | 9 |
| Gambar 7 Rotor sangkar motor induksi tiga fasa..... | 10 |
| Gambar 8 Rotor belitan motor induksi tiga fasa | 10 |
| Gambar 9 Bentuk gelombang sinusoidal dan timbulnya medan putar pada stator motor induksi..... | 12 |
| Gambar 10 Rangkaian ekivalen motor induksi..... | 14 |
| Gambar 11 Rangkaian VSI..... | 15 |
| Gambar 12 Rangkaian CSI | 15 |
| Gambar 13 Rangkaian <i>variable frequency drive</i> | 16 |
| Gambar 14 Gelombang dengan frekuensi kelipatan fundamental | 18 |
| Gambar 15 Bentuk gelombang fundamental, gelombang harmonisa, dan gelombang penjumlahan keduanya | 18 |
| Gambar 16 Konfigurasi filter pasif | 23 |
| Gambar 17 <i>Power quality analyzer HIOKI PW3198</i> | 31 |
| Gambar 18 Rangkaian Pengukuran <i>Power Quality Analyzer HIOKI PW3198</i> | 33 |
| Gambar 19 <i>Display konfigurasi yang benar pada power quality analyzer HIOKI PW3198</i> | 34 |
| Gambar 20 <i>Setting recording pada power quality analyzer HIOKI PW3198</i> | 34 |
| Gambar 21 Hasil pengukuran harmonisa pada <i>software PQ ONE</i> | 35 |
| Gambar 22 Algoritma simulasi harmonisa..... | 36 |
| Gambar 23 Diagram alir penelitian..... | 38 |
| Gambar 24 <i>Single line diagram cooler PT. Semen Tonasa Unit V</i> | 40 |
| Gambar 25 <i>Single line diagram fan cooler PT. Semen Tonasa Unit V</i> | 41 |
| Gambar 26 Pemodelan <i>single line diagram fan cooler</i> | 42 |
| Gambar 27 Simulasi aliran daya pada <i>fan cooler</i> | 43 |
| Gambar 28 Simulasi harmonisa sumber fasa R pada <i>fan cooler</i> | 44 |
| Gambar 29 (a) Spektrum harmonisa tegangan bus LV03 dan LV04 sumber fasa R | 48 |
| (b) gelombang tegangan terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa R | 48 |
| Gambar 30 (a) Spektrum harmonisa arus bus LV03 dan LV04 sumber fasa R | 49 |
| (b) Gelombang arus terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa R.. | 49 |
| Gambar 31 Simulasi harmonisa sumber fasa S pada <i>fan cooler</i> | 50 |
| Gambar 32 (a) Spektrum harmonisa tegangan bus LV03 dan LV04 sumber fasa S | 53 |
| (b) Gelombang tegangan terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa S | 53 |
| Gambar 33 (a) Spektrum harmonisa arus bus LV03 dan LV04 sumber fasa S..... | 54 |
| (b) Gelombang arus terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa S.. | 54 |
| Gambar 34 Simulasi harmonisa sumber fasa T pada <i>fan cooler</i> | 55 |

| | |
|--|----|
| Gambar 35 (a) Spektrum harmonisa tegangan bus LV03 dan LV04 sumber fasa T..... | 58 |
| (b) Gelombang tegangan terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa T | 58 |
| Gambar 36 (a) Spektrum harmonisa arus bus LV03 dan LV04 sumber fasa T..... | 59 |
| (b) Gelombang arus terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa T .. | 59 |
| Gambar 37 Rangkaian filter pasif jenis <i>single tuned</i> | 61 |
| Gambar 38 <i>Harmonic filter editor software</i> ETAP | 67 |
| Gambar 39 <i>Size filter harmonic editor software</i> ETAP | 67 |
| Gambar 40 Simulasi harmonisa sumber fasa R pada <i>fan cooler</i> setelah pemasangan filter | 68 |
| Gambar 41 (a) Spektrum harmonisa tegangan bus LV03 dan LV04 sumber fasa R setelah pemasangan filter..... | 71 |
| (b) Gelombang tegangan terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa R setelah pemasangan filter | 71 |
| Gambar 42 (a) Spektrum harmonisa arus bus LV03 dan LV04 sumber fasa R setelah pemasangan filter | 72 |
| (b) Gelombang arus terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa R setelah pemasangan filter | 72 |
| Gambar 43 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDv LV03 sumber fasa R sebelum dan setelah pemasangan filter | 73 |
| Gambar 44 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDv LV04 sumber fasa R sebelum dan setelah pemasangan filter | 73 |
| Gambar 45 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDi LV03 sumber fasa R sebelum dan setelah pemasangan filter | 74 |
| Gambar 46 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDi LV04 sumber fasa R sebelum dan setelah pemasangan filter | 74 |
| Gambar 47 Simulasi harmonisa sumber fasa S pada <i>fan cooler</i> setelah pemasangan filter | 75 |
| Gambar 48 (a) Spektrum harmonisa tegangan bus LV03 dan LV04 sumber fasa S setelah pemasangan filter | 78 |
| (b) Gelombang tegangan terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa S setelah pemasangan filter..... | 78 |
| Gambar 49 (a) Spektrum harmonisa arus bus LV03 dan LV04 sumber fasa S setelah pemasangan filter | 79 |
| (b) Gelombang arus terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa S setelah pemasangan filter | 79 |
| Gambar 50 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDv LV03 sumber fasa S sebelum dan setelah pemasangan filter | 80 |
| Gambar 51 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDv LV04 sumber fasa S sebelum dan setelah pemasangan filter | 80 |
| Gambar 52 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDi LV03 sumber fasa S sebelum dan setelah pemasangan filter | 81 |
| Gambar 53 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDi LV04 sumber fasa S sebelum dan setelah pemasangan filter | 81 |
| Gambar 54 Simulasi harmonisa sumber fasa T pada <i>fan cooler</i> setelah pemasangan filter | 82 |

| | |
|--|----|
| Gambar 55 (a) Spektrum harmonisa tegangan bus LV03 dan LV04 sumber fasa T setelah pemasangan filter | 85 |
| (b) Gelombang tegangan terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa T setelah pemasangan filter..... | 85 |
| Gambar 56 (a) Spektrum harmonisa arus bus LV03 dan LV04 sumber fasa T setelah pemasangan filter | 86 |
| (b) Gelombang arus terdistorsi bus LV03 dan LV04 sumber fasa T setelah pemasangan filter | 86 |
| Gambar 57 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDv LV03 sumber fasa T sebelum dan setelah pemasangan filter | 87 |
| Gambar 58 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDv LV04 sumber fasa T sebelum dan setelah pemasangan filter | 87 |
| Gambar 59 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDi LV03 sumber fasa T sebelum dan setelah pemasangan filter | 88 |
| Gambar 60 Grafik perbandingan hasil simulasi IHDi LV04 sumber fasa T sebelum dan setelah pemasangan filter | 88 |
| Gambar 61 Simulasi aliran daya pada <i>fan cooler</i> setelah pemasangan filter..... | 89 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|-----|
| Lampiran 1 Data hasil pengukuran harmonisa arus | 94 |
| Lampiran 2 Spesifikasi <i>switchgear</i> | 98 |
| Lampiran 3 Spesifikasi transformator | 99 |
| Lampiran 4 Spesifikasi motor induksi tiga fasa | 100 |
| Lampiran 5 Spesifikasi <i>variable frequency drive</i> (VFD)..... | 102 |
| Lampiran 6 Surat pengambilan data penelitian..... | 104 |
| Lampiran 7 Dokumentasi lapangan | 105 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik memiliki peranan yang penting bagi kegiatan sektor industri dalam menjalankan aktivitas proses produksi. Menteri Perindustrian (2020) mengatakan bahwa “Sektor industri memerlukan listrik yang ketersediaannya terus berlanjut (*sustainable*), hal tersebut akan mendukung industri dalam negeri untuk menyediakan produk yang berkualitas dan berdaya saing”. Untuk menjaga ketersediaan energi listrik yang terus berlanjut, maka aspek mengenai energi listrik seperti kualitas energi listrik harus diperhatikan. Namun dengan meningkatnya proses produksi di sektor industri menyebabkan peran penggunaan alat-alat listrik yang bersifat non linier akan semakin luas.

PT. Semen Tonasa merupakan produsen semen terbesar di Kawasan Timur Indonesia. Perusahaan dengan pabrik yang berjumlah 4 unit yaitu Pabrik Tonasa II, III, IV dan V ini mampu memproduksi semen dalam jumlah yang banyak serta dapat mengirim semen ke berbagai tempat di seluruh Indonesia. PT Semen Tonasa Unit V yang berlokasi di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, Sulawesi Selatan memproduksi semen dengan kapasitas 2.500.000 ton semen per tahun dengan dukungan suplai 2×35 MW dari PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) dan terhubung dengan sistem gardu induk dari PLN (Perusahaan Listrik Negara).

Dalam proses produksinya, PT Semen Tonasa Unit V banyak menggunakan motor-motor listrik diantaranya adalah motor induksi tiga fasa. Motor induksi tiga fasa dipilih karena konstruksinya sederhana, kuat dan mudah dalam pemeliharaannya, sehingga sangat tepat digunakan sebagai penggerak mesin produksi seperti: penggerak pompa, penggerak kipas (*fan*) maupun sebagai penggerak *conveyor* (Zondra et al, 2023). Namun yang menjadi pertimbangan dalam pengaplikasiannya adalah sistem pengaturan kecepatan dari motor ini sangat mempengaruhi efisiensinya dan tergantung pada jenis motor serta sistem

pengendalinya. Sebagian besar alat yang digunakan sebagai pengatur kecepatan putaran motor induksi tiga fasa adalah *Variable Frequency Drive (VFD)*.

Variable Frequency Drive (VFD) merupakan peralatan yang terdiri dari rangkaian *rectifier* dan *inverter*. Penggunaan VFD bertujuan untuk menghemat energi listrik dan mengurangi arus *start* yang membuat pengoperasian mesin menjadi lebih halus, namun VFD ini memiliki sebagian besar komponen elektronika yang dapat dikategorikan sebagai beban non linear yang akan menimbulkan harmonisa pada sistem kelistrikan (Foqha et al, 2023).

Harmonisa ini merupakan distorsi yang terjadi pada arus dan tegangan listrik akibat pembentukan gelombang lain dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamentalnya (Koerniawan & Hasanah, 2019). Tingginya tingkat harmonisa pada sistem tenaga listrik dapat menyebabkan kualitas daya sistem menjadi lebih buruk, mengancam keberlanjutan energi listrik, dan menimbulkan dampak yang merugikan pada peralatan listrik. Dimana peralatan listrik tersebut akan mengalami penurunan kerja dan bahkan mengalami kerusakan. Dampak harmonisa pada motor induksi adalah meningkatnya rugi-rugi tembaga dan inti yang akan menurunkan efisiensi motor. Salah satu contoh kasus dari dampak harmonisa yang terjadi pada tanggal 15 Juni 2022, menyebabkan kerusakan pada *Shaft RCA Motor Main Drive Atox di Coal Mill 4 PT. Semen Tonasa*, dimana *Shaft* motor tersebut patah dan hasil investigasi oleh PT. Semen Tonasa menunjukkan bahwa *Total Harmonic Distortion (THD) Arus* sebesar 29,13% yang melebihi standar IEEE 519-2014 (Bahtiar, 2023).

Salah satu metode yang biasa digunakan dalam mereduksi harmonisa yang terjadi pada *Variable Frequency Drive (VFD)* dengan menggunakan filter harmonisa yaitu filter pasif. Filter ini terdiri dari kombinasi komponen induktansi dan kapasitansi, tentunya lebih disukai dibandingkan filter harmonisa lainnya karena kesederhanaannya, biaya rendah, dan keandalan yang cukup tinggi. Dengan desain dan implementasi yang tepat, filter pasif dapat meningkatkan kualitas daya secara signifikan dan melindungi peralatan dari kerusakan yang disebabkan oleh harmonisa yang dihasilkan VFD (Foqha et al, 2023).

Dengan mempertimbangkan keadaan tersebut, peneliti akan menginvestigasi kandungan harmonisa arus dan tegangan motor induksi tiga fasa akibat

penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) pada *Fan Cooler* PT. Semen Tonasa Unit V. Apabila nilai harmonisa arus dan tegangan tersebut tidak memenuhi standar yang sudah ditetapkan, maka dilakukan pengurangan nilai harmonisa dengan perancangan filter pasif agar kerugian akibat harmonisa dapat diminimalisir.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Berapa besar kandungan harmonisa pada *Fan Cooler* PT. Semen Tonasa Unit V akibat penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) dan apakah nilai harmonisa tersebut memenuhi standar IEEE 519-2014?
2. Bagaimana kemampuan rancangan filter pasif *single tuned* untuk mereduksi harmonisa yang melebihi standar IEEE 519-2014?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui besar kandungan harmonisa pada *Fan Cooler* PT. Semen Tonasa Unit V akibat penggunaan *variable frequency drive* (VFD) dan membandingkan nilai harmonisa tersebut dengan standar IEEE 519-2014 untuk mengetahui apakah nilai harmonisa yang muncul masih dalam batas standar atau tidak.
2. Memberikan solusi dengan perancangan filter pasif *single tuned* untuk mereduksi harmonisa yang melebihi standar IEEE 519-2014.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan dapat bermanfaat untuk:

1. Memberikan pengetahuan mengenai harmonisa akibat penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) pada motor induksi tiga fasa sehingga

dapat menjadi perhatian dalam pemakaian pengontrolan motor-motor listrik yang bersifat beban non-linier.

2. Dapat menjadi acuan ke depan untuk mengatasi permasalahan harmonisa listrik dan menghindari berbagai kemungkinan kerugian yang ditimbulkan.
3. Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai referensi dalam pengembangan penelitian ke depannya.

1.5 Ruang Lingkup

Pada penelitian ini melingkupi hal-hal sebagai berikut:

1. Pengambilan data dilakukan secara langsung di *Fan Cooler* PT Semen Tonasa Unit V.
2. Data yang digunakan pada simulasi adalah data nominal dari semua peralatan yang digunakan.
3. Simulasi harmonisa dan perancangan filter pasif *single tuned* menggunakan *software* ETAP 19.0.1.
4. Nilai harmonisa arus dan tegangan yang digunakan mengacu pada standar yang ditetapkan *Institute of Electrical and Electronic Engineer* (IEEE) 519-2014.
5. Alat ukur yang digunakan dalam pengukuran adalah *Power Quality Analyzer* HIOKI PW3198.
6. Tidak membahas mengenai resonansi filter.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan teori-teori relevan yang mendukung penelitian yang meliputi *fan* pada *cooler*, motor induksi tiga fasa, *Variable Frequency*

Drive (VFD), harmonisa, filter pasif harmonisa, penelitian terdahulu yang digunakan sebagai referensi, serta teori penunjang yang lain yang digunakan sebagai bahan penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini berisi waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, teknik pengukuran, teknik pengumpulan data, dan diagram alir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas tingkat gangguan harmonisa yang dihasilkan motor induksi tiga fasa akibat penggunaan *variable frequency drive* (VFD). Penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan software ETAP 19.0.1 dengan memasukkan data hasil pengukuran serta data sekunder mengenai sistem kelistrikan *fan cooler*. Selanjutnya akan dibahas desain filter, pemasangan filter, dan pengaruh dari pemasangan filter di sistem kelistrikan *Fan Cooler* PT Semen Tonasa Unit V.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian penyelesaian kasus gangguan harmonisa yang telah diperoleh melalui simulasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

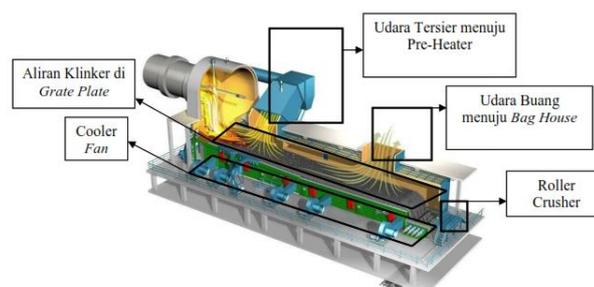
2.1 *Fan pada Cooler*

Dalam proses produksi semen, setelah terjadi proses pembakaran di Kiln maka untuk tahap selanjutnya dilakukan proses pendinginan material oleh *clinker cooler* seperti Gambar 1 yang merupakan tampilan *clinker cooler* di PT. Semen Tonasa Unit V. Klinker yang keluar dari kiln bersuhu tinggi, oleh karena itu harus didinginkan terlebih dahulu karena klinker yang panas sulit untuk ditransformasikan dan dapat merusak *conveyor*, selain itu klinker yang panas mempunyai pengaruh yang kurang baik karena mempengaruhi struktur, komposisi mineral, dan kualitas semen yang dihasilkan. Temperatur klinker masuk yaitu 1400°C dan keluar pada 200-300°C (Anindhitya, 2023).



Gambar 1 *Clinker cooler* PT. Semen Tonasa Unit V. Sumber: Anindhitya, 2023

Pada proses produksi semen di PT. Semen Tonasa Unit V digunakan teknologi *grate cooler* sebagai proses pendinginan klinker. Teknologi *grate cooler* ini digunakan karena efisiensinya lebih tinggi dibanding dengan jenis tipe pendingin *rotary cooler*. Untuk skema *grate cooler* ditunjukkan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2 Skema *grate cooler*. Sumber: Amin, 2019

Grate cooler merupakan salah satu teknologi yang digunakan di pabrik semen untuk mendinginkan klinker atau semen setengah jadi. Ilustrasi di atas merupakan proses pendinginan produksi semen dengan teknologi *grate cooler*. Pada proses pendinginan *grate cooler*, aliran klinker yang telah melewati proses pembakaran di kiln akan dijatuhkan menuju *grate plate*, *grate plate* ini berfungsi untuk menggerakkan aliran klinker dan memisahkan ukuran klinker berdasarkan ukuran *grate*-nya. Alat yang digunakan untuk mendinginkan klinker yaitu *cooling fan*. Terdapat sekitar 11 buah *fan* yang dioperasikan pada *Cooler PT*. Semen Tonasa Unit V. *Fan* ini bekerja pada kecepatan serta tekanan udara yang berbeda untuk setiap *fan*. *Cooling fan PT*. Semen Tonasa Unit V dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3 *Cooling fan*. Sumber: Dokumentasi lapangan

Proses pendinginan pada *grate cooler* dilakukan dengan menyemprotkan udara dari *fan* ke setiap *grate* pada *cooler*, yang berarti bahwa temperatur klinker hasil pendinginan di *cooler* sangat dipengaruhi oleh besarnya laju aliran (debit) udara yang disuplai oleh *fan*. Udara yang disuplai oleh *cooling fan* perlu dioperasikan sesuai dengan tumpukan klinker di atas *grate*, hal ini diperlukan agar mencegah udara yang tidak terdistribusi secara sempurna di *grate cooler*. Setelah melewati aliran *grate plate*, klinker akan dihancurkan oleh *roller crusher* yang berfungsi untuk mengecilkan kembali ukuran klinker yang selanjutnya akan dibawa ke tempat penyimpanan klinker (Amin, 2019).

2.2 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet rotor ke statornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi sangat banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Motor induksi tiga fasa dioperasikan pada sistem tenaga 3 fasa dengan bentuk umum dapat dilihat pada Gambar 4 (Bagia & Parsa, 2018).



Gambar 4 Bentuk fisik motor induksi tiga fasa. Sumber: Bagia & Parsa, 2018

Motor induksi yang umum dipakai di sektor industri adalah motor induksi tiga fasa, persentasenya hampir 90% (Yohana, 2024). Untuk bentuk fisik motor induksi tiga fasa di PT. Semen Tonasa Unit V dapat dilihat pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5 Motor induksi tiga fasa di industri. Sumber: Dokumentasi lapangan

2.2.1 Konstruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Pada dasarnya motor induksi terdiri dari suatu bagian yang tidak bergerak (stator), celah udara, dan bagian yang bergerak (rotor). Secara ringkas stator terdiri dari lilitan yang berisolasi dan pelat-pelat besi yang mempunyai ketebalan 0,35-0,5 mm, disusun menjadi sebuah blok yang berbentuk gelang dan di sisi

dalamnya dilengkapi dengan alur-alur. Dari sisi lain inti besi stator dan rotor terbuat dari lapisan baja silikon tebalnya 0,35-0,5 mm, tersusun rapi, masing-masing terisolasi secara elektrik dan terhubung singkat pada ujung-ujungnya. Celah udara antara stator dan rotor pada motor yang kecil adalah 0,25 – 0,75 mm, pada motor yang besar sampai 10 mm. Celah udara yang besar ini disediakan bagi kemungkinan terjadinya perenggangan pada sumbu sebagai akibat pembebanan transversal pada sumbu atau sambungannya (Yohana, 2024).

1. Bagian Stator

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan tiga fasa yang disebut kumparan stator, yang masing-masing kumparan mendapatkan suplai arus tiga fasa. Stator terdiri dari pelat-pelat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur-alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karena adanya fluks magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator (Yohana, 2024).



Gambar 6 Stator motor induksi tiga fasa. Sumber: Sutikno, 2019

2. Bagian Rotor

Seperti dengan stator di atas, rotor juga terdiri dari set laminasi beralur yang ditekan bersama dalam bentuk jalur magnetik dan sirkuit listrik. Berdasarkan bentuk rotornya, maka motor induksi dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu (Anthony, 2018):

- a. Motor induksi dengan rotor sangkar

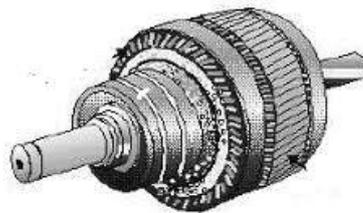
Konstruksi gulungan rotor ini menyerupai “kandang tupai”. Potongan aluminium rotor biasanya dicor mati ke dalam slot rotor, yang membuat konstruksinya sangat kasar. Meskipun potongan rotor aluminium berada dalam kontak langsung dengan laminasi baja, hampir semua arus rotor melalui jeruji aluminium dan tidak di laminasi. Sejumlah motor induksi yang beredar di pasaran maupun yang banyak digunakan sekitar 90% adalah motor induksi dengan “Rotor Sangkar”. Alasan umum yang diperoleh adalah karena konstruksi yang sederhana dan juga lebih murah harganya (Yohana, 2024). Berikut ini konstruksi rotor sangkar motor induksi tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Rotor sangkar motor induksi tiga fasa. Sumber: Sutikno, 2019

b. Motor induksi dengan rotor belitan

Seperti namanya rotor belitan dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dengan poros motor. Ketiga cincin slip yang terpasang pada cincin slip dan sikat-sikat dapat dilihat berada disebelah kiri lilitan rotor. Lilitan rotor tidak dihubungkan ke pencatu. Cincin slip dan sikat semata-mata merupakan penghubung tahanan kendali variabel luar ke dalam rangkain motor. Rotor ini terbuat dari laminasi-laminasi besi dengan alur-alur sebagai tempat meletakkan belitan (kumparan) dengan ujung-ujung belitan yang juga terhubung singkat (Yohana, 2024). Berikut ini konstruksi rotor belitan motor induksi tiga fasa dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Rotor belitan motor induksi tiga fasa. Sumber: Yohana, 2024

2.2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi bekerja berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator kepada kumparan rotornya. Bila kumparan stator motor induksi tiga fasa yang dihubungkan dengan suatu sumber tegangan 3 fasa, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Garis-garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Karena penghantar (kumparan) rotor merupakan rangkaian yang tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor. Penghantar (kumparan) rotor yang dialiri arus ini berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi yang cenderung menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator (Anthony, 2018).

Medan putar pada stator tersebut akan memotong konduktor-konduktor pada rotor, sehingga terinduksi arus; dan sesuai dengan Hukum Lenz, rotor pun akan turut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban, akan memperbesar kopel motor yang oleh karenanya akan memperbesar pula arus induksi pada rotor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi. Bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun (Anthony, 2018).

Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot-slotnya yang dililitkan pada sejumlah kutub tertentu. Jumlah kutub ini menentukan kecepatan berputarnya medan stator yang terjadi yang diinduksikan ke rotornya. Makin besar jumlah kutub akan mengakibatkan makin kecilnya kecepatan putar medan stator dan sebaliknya. Kecepatan berputarnya medan putar ini disebut kecepatan sinkron. Besarnya kecepatan sinkron ini ditunjukkan oleh Persamaan (1) berikut (Anthony, 2018):

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

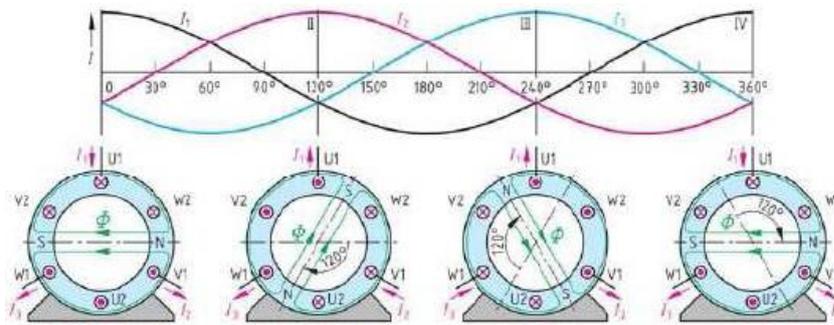
Keterangan:

f = frekuensi sumber AC (Hz)

p = jumlah kutub

N_s = kecepatan putaran sinkron medan magnet stator (rpm)

Prinsip kerja motor induksi ini juga dapat dijelaskan dengan gelombang sinusoidal seperti pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9 Bentuk gelombang sinusoidal dan timbulnya medan putar pada stator motor induksi. Sumber: Yohana, 2024

Terbentuknya medan putar pada stator motor induksi. Tampak stator dengan dua kutub, dapat diterangkan dengan empat kondisi (Yohana, 2024):

1. Saat sudut 0° . Arus I_1 bernilai positif sedangkan arus I_2 dan arus I_3 bernilai negatif dalam hal ini belitan V_2 , U_1 dan W_2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan belitan V_1 , U_2 dan W_1 bertanda titik (arus listrik menuju pembaca). terbentuk fluk magnet pada garis horizontal sudut 0° . kutub S (south = selatan) dan kutub N (north = utara).
2. Saat sudut 120° . Arus I_2 bernilai positif sedangkan arus I_1 dan arus I_3 bernilai negatif, dalam hal ini belitan W_2 , V_1 dan U_2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat W_1 , V_2 dan U_1 bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser 120° dari posisi awal.
3. Saat sudut 240° . Arus I_3 bernilai positif dan I_1 dan I_2 bernilai negatif, belitan U_2 , W_1 , dan V_2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat U_1 , $2W_2$ dan V_1 bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser 120° dari posisi kedua.
4. Saat sudut 360° . Posisi ini sama dengan saat sudut 0° . Dimana kutub S dan N kembali ke posisi awal sekali. Dari keempat kondisi di atas saat sudut 0° ; 120° ; 240° ; 360° , dapat dijelaskan terbentuknya medan putar pada stator, medan magnet putar stator akan memotong belitan rotor. Kecepatan medan putar stator ini sering disebut kecepatan sinkron.

2.2.3 Slip pada Motor Induksi

Apabila rotor dari motor induksi berputar dengan kecepatan N_r , dan medan magnet stator berputar dengan kecepatan N_s , maka perbedaan kecepatan relatif antara kecepatan medan magnet putar stator terhadap kecepatan rotor ini disebut dengan kecepatan slip yang besarnya dapat dihitung dengan Persamaan (2) (Anthony, 2018):

$$Kec. Slip = N_s - N_r \quad (2)$$

Keterangan:

N_r = Medan putar rotor (rpm)

Kemudian slip (s) merupakan perbandingan antara kecepatan slip dengan kecepatan medan magnet statornya, yang dapat dirumuskan dengan Persamaan (3) (Anthony, 2018):

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (3)$$

Frekuensi yang masuk ke kumparan stator adalah frekuensi sumber dari sistem tenaga yang digunakan yang berasal dari frekuensi pembangkit sistem tenaga listrik. Bila kita namakan bagian pada stator ini adalah bagian 1 (semua tanda di stator kita tanda 1) dan bagian pada rotor kita namakan bagian 2 (semua tanda di rotor kita beri tanda 2), maka bila mengacu kembali ke persamaan (1), dan kita beri nama ulang frekuensi dengan nama f_1 (karena masuk ke bagian stator), maka rumus ini dapat kita tulis ulang seperti pada Persamaan (4) (Anthony, 2018):

$$f_1 = \frac{N_s \cdot p}{120} \quad (4)$$

Dan dapat pula kita buat besarnya frekuensi yang sampai ke kumparan rotor sebagai f_2 yang nilainya dari Persamaan (5):

$$f_2 = \frac{(N_s - N_r) \cdot p}{120} \quad (5)$$

Dengan membagi Persamaan (5) dengan persamaan (4), maka didapatkan hasil seperti pada Persamaan (6) (Anthony, 2018):

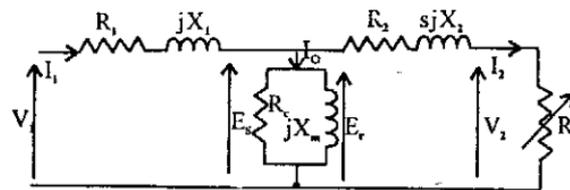
$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \quad (6)$$

Dengan mengacu ke persamaan (3) dan (6), maka dapat dibuatkan lebih sederhana seperti pada Persamaan (7) (Anthony, 2018):

$$f_2 = sf_1 \quad (7)$$

2.2.4 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Pada prinsipnya proses “induksi” yang terjadi pada motor induksi hampir sama seperti pada transformator yang berbeban resistif, sehingga penggambaran rangkaian ekivalen motor induksi berdasarkan rangkaian ekivalen transformator, dimana stator identik dengan sisi primer transformator dan rotor identik dengan sisi sekunder transformator seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Perbedaan yang mendasar antara keduanya adalah transformator merupakan mesin listrik statis, sedangkan motor induksi merupakan mesin listrik dinamis (Wijaya, 2001).



Gambar 10 Rangkaian ekivalen motor induksi. Sumber: Wijaya, 2001

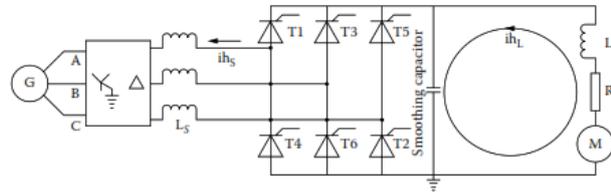
2.3 Variable Frequency Drive (VFD)

VFD pada kenyataannya adalah konverter daya. VFD sendiri merupakan bidang penerapan yang luas yang digunakan dalam berbagai proses industri. Pada VFD terdapat beberapa komponen utama seperti rectifier (penyearah), saluran DC, dan inverter. Pada penyearah ujung depan dalam rangkaian VFD dapat menggunakan dioda, thyristor, IGBT, atau saklar semikonduktor lainnya, melakukan proses pergantian di mana arus ditransfer dari satu fasa ke fasa lainnya. Desain VFD juga menentukan di mana arus harmonisa akan mempunyai dampak yang dominan. Misalnya, inverter jenis *Voltage Source Inverter* (VSI) dan *Current Source Inverter* (CSI) (De La Rosa, 2006).

1. *Voltage Source Inverter* (VSI)

VSI memerlukan input tegangan DC yang konstan ke tahap inverter. Hal ini dicapai dengan kapasitor atau filter pada tautan DC (Dugan et al, 2004). VSI menghasilkan bentuk gelombang kompleks yang menunjukkan

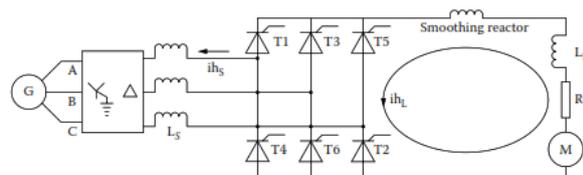
distorsi harmonisa yang signifikan pada tegangan dan lebih kecil pada bentuk gelombang arus. Untuk lebih jelasnya rangkaian VSI ditunjukkan pada Gambar 11 berikut.



Gambar 11 Rangkaian VSI. Sumber: De La Rosa, 2006

2. Current Source Inverter (CSI)

CSI memerlukan masukan arus konstan; karenanya, induktor seri ditempatkan pada tautan DC (Dugan et al, 2004). CSI menghasilkan bentuk gelombang arus dengan kandungan harmonisa yang cukup besar dengan bentuk gelombang tegangan mendekati sinusoidal. Untuk lebih jelasnya rangkaian CSI ditunjukkan pada Gambar 12 berikut.



Gambar 12 Rangkaian CSI. Sumber: De La Rosa, 2006

Untuk mengilustrasikan lebih lanjut konverter daya sebagai sumber harmonisa, dapat dilihat dari VFD enam pulsa pada Gambar 11 dan 12. Arus harmonisa, i_{hL} , yang dihasilkan oleh mesin yang berputar akan dibatasi pada sisi beban, di luar bus DC. Akibat pergantian arus dari satu fasa ke fasa lain selama proses penyearah pada konverter, maka arus harmonisa, i_{hS} , akan muncul di sisi sumber. Dapat ditunjukkan bahwa arus yang ditarik oleh konverter enam pulsa mengandung harmonisa dengan urutan sesuai dengan Persamaan (8) (De La Rosa, 2006).

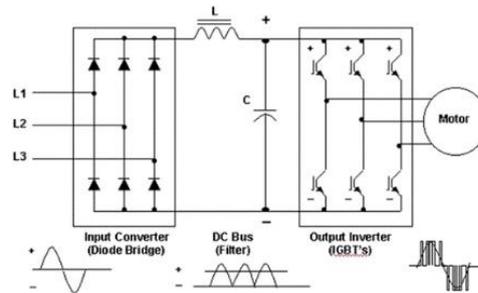
$$n = (P * i \pm 1) \quad (8)$$

dimana i adalah bilangan bulat yang lebih besar dari atau sama dengan 1.

Untuk konverter 6 pulsa, $P = 6$ maka arus saluran mengandung harmonisa orde 5, 7, 11, 13,.... Ini disebut sebagai harmonisa karakteristik dari konverter enam pulsa. Untuk konverter 12 pulsa (dua unit enam pulsa secara paralel), harmonisa karakteristiknya adalah 11, 13, 23, 25, 35, 37,.... (De La Rosa, 2006).

2.3.1 Prinsip Kerja *Variable Frequency Drive* (VFD)

Karena rangkaian VFD merupakan inverter, maka secara sederhana prinsip dasarnya yaitu mengubah frekuensi menjadi lebih kecil atau lebih besar dengan mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC kemudian dijadikan tegangan AC lagi dengan frekuensi yang berbeda atau dapat diatur. Berikut ini merupakan rangkaian dari *variable frequency drive* yang ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13 Rangkaian *variable frequency drive*. Sumber: <https://jagootomasi.com/dasar-pengoperasian-inverter-untuk-pengendalian-motor-induksi-ac-3-fasa/>

Prinsip kerja VFD adalah (Fakhri et al, 2022):

- Tegangan yang masuk dari jala-jala 50 Hz merupakan tegangan arus bolak-balik (AC) dengan nilai tegangan dan frekuensi yang konstan. Kemudian tegangan dan frekuensi tersebut dialirkan ke *board rectifier* atau penyearah DC, dan ditampung ke *bank capacitor*. Jadi dari AC dijadikan DC.
- Untuk meratakan tegangan DC, maka tegangan dimasukkan ke DC link. Komponen yang terdapat pada DC link berupa kapasitor atau induktor.
- Tegangan DC kemudian diumpankan ke board inverter untuk dijadikan AC kembali dengan frekuensi sesuai kebutuhan. Jadi dari DC ke AC yang komponen utamanya adalah semikonduktor aktif seperti IGBT. Dengan menggunakan frekuensi *carrier* (bisa sampai 20 kHz), tegangan DC dicacah dan dimodulasi sehingga keluar tegangan dan frekuensi yang diinginkan.

2.4 Harmonisa

Bentuk gelombang tegangan dan arus yang ditransmisikan maupun didistribusikan dari sumber ke beban berbentuk gelombang sinusoidal murni.

Namun, selama proses transmisi dan distribusi, terjadi berbagai jenis interferensi, sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal murni. Salah satu fenomena sebagai bentuk penyimpangan dari bentuk gelombang sinusoidal adalah distorsi harmonisa. Distorsi harmonisa ini didefinisikan sebagai gangguan yang terjadi pada sistem kelistrikan yang disebabkan oleh adanya distorsi pada gelombang arus dan tegangan, sehingga gelombang arus dan tegangan tidak lagi berbentuk sinusoidal (Dugan et al., 2004).

Frekuensi operasi normal yang digunakan dalam sistem tenaga listrik adalah 50 Hz atau 60 Hz tergantung negara yang menggunakannya. Di Indonesia menggunakan frekuensi sebesar 50 Hz dalam pengoperasian sistem tenaga listriknya. Namun dalam penerapannya yang bergantung pada beban yang digunakan, terdapat beberapa beban yang membuat frekuensi arus dan tegangan menjadi tidak normal atau bahkan menjadi kelipatan dari frekuensi fundamentalnya. Apabila frekuensi fundamentalnya bernilai 50 Hz maka kelipatan dari frekuensi fundamental berturut-turut adalah 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, dan seterusnya sehingga dapat dibuat persamaan umum seperti pada Persamaan (9) berikut ini (De La Rosa, 2006).

$$f_h = h \times f_1 \quad (9)$$

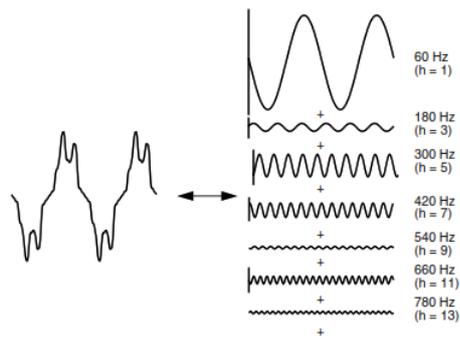
Keterangan:

f_h = Frekuensi harmonisa

f_1 = Frekuensi fundamental

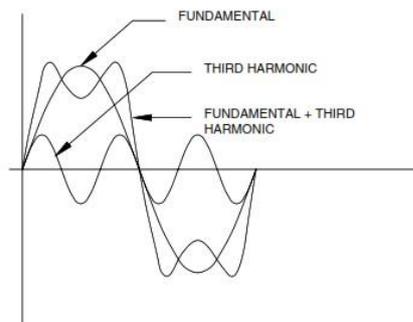
h = Orde harmonisa

Ketika gelombang fundamental membentuk satu gelombang penuh dalam hal ini pada orde pertama, maka untuk orde harmonisa ganjil bentuk gelombang pada orde ketiga membentuk tiga gelombang penuh, sama halnya dengan orde kelima akan membentuk lima gelombang penuh dan begitupun seterusnya hingga orde selanjutnya. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 14 berikut.



Gambar 14 Gelombang dengan frekuensi kelipatan fundamental. Sumber: Dugan et al., 2004

Gelombang ini kemudian melekat dengan gelombang fundamental sehingga membentuk gelombang tidak sinusoidal yang merupakan hasil penjumlahan gelombang fundamental sesaat dengan harmonisanya, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 15 berikut.



Gambar 15 Bentuk gelombang fundamental, gelombang harmonisa, dan gelombang penjumlahan keduanya. Sumber: Sankaran, 2002

2.4.1 Jenis Harmonisa

Berdasarkan ordenya, harmonisa dapat dibedakan menjadi harmonisa ganjil dan harmonisa genap. Harmonisa ganjil mewakili bilangan ganjil (misalnya 3, 5, 7, 9, 11 hingga seterusnya), dan harmonisa genap mewakili bilangan genap (misalnya 2, 4, 6, 8, 10 hingga seterusnya). Harmonisa ke-1 ditetapkan sebagai gelombang frekuensi dasar atau fundamental. Harmonisa 0 mewakili konstanta atau komponen DC dari bentuk gelombang. Komponen DC yang dimaksud adalah perbedaan bersih antara bagian positif dan negatif dari satu siklus gelombang penuh (Sankaran, 2002).

Pada sistem kelistrikan tiga fasa seimbang dengan urutan fasa R-S-T, ketiga tegangan setiap fasa selalu sama dan memiliki beda sudut listrik sebesar 120° dan

begitu pula ketiga arusnya. Sehingga berdasarkan urutan fasanya, harmonisa dapat dibagi menjadi 3 jenis yaitu (Aini & Mar'i, 2021):

1. Harmonisa Urutan Positif

Jenis harmonisa urutan positif ini mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan saling berbeda fasa 120° dengan urutan fasa R-S-T. Dimana harmonisa positif ini terdiri dari harmonisa ke-1, ke-4, ke-7, ke-10, dan seterusnya.

2. Harmonisa Urutan Negatif

Harmonisa urutan negatif mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan saling berbeda fasa 120° dengan urutan fasa R-T-S. Dimana harmonisa negatif ini terdiri dari harmonisa ke-2, ke-5, ke-8, dan seterusnya.

3. Harmonisa Urutan Nol

Harmonisa urutan nol ini memiliki fasor yang sama besarnya dan beda fasa sama dengan 0° (sefasa satu sama lain). Harmonisa urutan nol ini terdiri dari harmonisa ke-3, ke-6, ke-9, dan seterusnya.

2.4.2 Standardisasi Harmonisa

Berdasarkan IEEE 519-2014, bahwa dalam menentukan standar harmonisa terdapat dua kriteria yang digunakan untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, yang pertama adalah batasan harmonisa tegangan (V_{THD}) dan yang kedua yaitu batasan harmonisa arus (I_{THD}). Tabel 1 di bawah ini memperlihatkan batasan harmonisa untuk tegangan.

Tabel 1 *Voltage distortion limits*

| <i>Bus Voltage V at PCC</i> | <i>Individual Harmonic (%)</i> | <i>Total Harmonic Distortion (%)</i> |
|---|--------------------------------|--------------------------------------|
| $V \leq 1.0 \text{ kV}$ | 5.0 | 8.0 |
| $1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$ | 3.0 | 5.0 |
| $69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$ | 1.5 | 2.5 |
| $161 \text{ kV} < V$ | 1.0 | 1.5 |

Sumber: IEEE 519-2014

Sedangkan Tabel 2 berikut ini adalah batasan harmonisa arus:

Tabel 2 *Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV*

| I_{SC} / I_L | Maximum Harmonic Current Distortion | | | | | TDD (%) |
|----------------|--|------------------|------------------|------------------|---------------------|----------------|
| | <i>(in % of I_L)</i> | | | | | |
| | <i>Individual Harmonic Order</i> | | | | | |
| | $3 \leq h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h \leq 50$ | |
| < 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 |

Sumber: IEEE 519-2014

Untuk standar harmonisa arus ditentukan oleh SC_{ratio} (hasil bagi antara arus hubung singkat (I_{SC}) dan arus beban maksimum (I_L)), sedangkan untuk standar harmonisa tegangan ditentukan oleh tegangan sistem yang dipakai (Dugan et al., 2004). SC_{ratio} dapat dirumuskan dengan Persamaan (10) sebagai berikut:

$$SC_{ratio} = \frac{I_{SC}}{I_L} \quad (10)$$

Dimana, I_{SC} (arus hubung singkat) dapat dicari dengan Persamaan (11):

$$I_{SC} = \frac{S (KVA)}{\sqrt{3} \times kV} \quad (11)$$

Keterangan:

S = Kapasitas daya semu pada transformator (VA)

kV = Tegangan sisi sekunder (V)

Dan, I_L (arus beban maksimum) dapat dicari dengan Persamaan (12):

$$I_L = \frac{P (kW)}{PF \times \sqrt{3} \times kV} \quad (12)$$

Keterangan:

P = Permintaan daya (W)

PF = Faktor daya

2.4.3 Indeks Harmonisa

Untuk menganalisis pengaruh harmonisa terhadap kualitas tegangan dan arus ditentukan oleh indeks harmonisa. Berikut adalah beberapa pengertian dan persamaan yang terdapat dalam analisis harmonisa:

1. *Individual Harmonic Distortion* (IHD)

Individual Harmonic Distortion adalah perbandingan antara nilai arus atau tegangan harmonisa orde ke-h dengan nilai arus atau tegangan fundamental dan dinyatakan dalam bentuk persen (%). Untuk harmonisa tegangan dan arus pada orde ke-h, dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (13) dan (14) berikut (Sankaran, 2002).

$$IHD_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (13)$$

$$IHD_i = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (14)$$

Keterangan:

V_h = Tegangan harmonisa pada orde ke-h (V)

V_1 = Tegangan fundamental (V)

I_h = Arus harmonisa pada orde ke-h(A)

I_1 = Arus fundamental (A)

2. *Total Harmonic Distortion* (THD)

THD adalah perbandingan antara nilai rms dari seluruh komponen harmonisa terhadap nilai rms dari fundamental, dan dinyatakan dalam bentuk persen (%). Semakin besar persentase THD ini menandakan semakin besarnya penyimpangan dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa terhadap gelombang sinusoidal murninya. Untuk gelombang sinusoidal murni nilai dari THD nya adalah 0%, sedangkan untuk menentukan besar THD tegangan maupun arus dapat menggunakan Persamaan (15) dan (16) (De La Rosa, 2006).

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (15)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (16)$$

2.4.4 Dampak Harmonisa

Keberadaan harmonisa dalam suatu sistem tenaga listrik memberikan efek negatif yang dapat merugikan, adapun dampak negatif karena harmonisa adalah sebagai berikut:

1. Penurunan faktor daya

Semakin menurunnya faktor daya menyebabkan semakin meningkatnya arus yang mengalir pada sistem kelistrikan, hal tersebut menghasilkan rugi-rugi daya yang semakin besar. Rugi-rugi daya tersebut menimbulkan panas pada peralatan sehingga dapat merugikan sistem. Berdasarkan hal tersebut, berikut dampak rugi-rugi dan panas akibat arus harmonisa (Aini & Mar'i, 2021):

- a. Panas tersebut dapat menyebabkan derating pada transformator
- b. Panas yang berlebihan yang merusak isolasi
- c. Meningkatkan susut jaringan
- d. Malfungsi kerja peralatan sistem tenaga
- e. Mempercepat penuaan pada peralatan.

2. Kesalahan pembacaan alat ukur kWh

Dampak dari harmonisa juga mengakibatkan penurunan keakuratan pengukuran dari alat-alat ukur yang bekerja berdasarkan induksi, seperti alat ukur (kWh) yang dirancang untuk gelombang sinusoidal. Harmonisa menambahkan torsi elektromagnetik dan kopel sehingga hasil pengukuran akan lebih tinggi dan biaya listrik akan lebih mahal.

3. Torsi yang berlawanan

Harmonisa pada motor dapat menghambat putaran motor. Hal tersebut terjadi karena adanya harmonisa urutan negatif. Jika hal ini terjadi maka akan mengakibatkan kerusakan pada rotor motor dan arus yang diserap oleh motor semakin besar sehingga rugi-rugi daya juga semakin besar.

2.4.5 Filter Harmonisa

Filter harmonisa merupakan rangkaian yang berfungsi untuk memperbaiki bentuk gelombang tegangan maupun arus yang terdistorsi oleh harmonisa, sehingga bentuknya akan menjadi menyerupai sinusoidal murni. Dengan adanya filter harmonisa pada suatu sistem kelistrikan yang mengandung sumber harmonisa, maka penyebaran dari arus harmonisa ke seluruh sistem dapat ditekan sekecil mungkin (Ardita, 2020). Secara umum filter harmonisa pada sistem kelistrikan dibedakan menjadi filter aktif dan filter pasif.

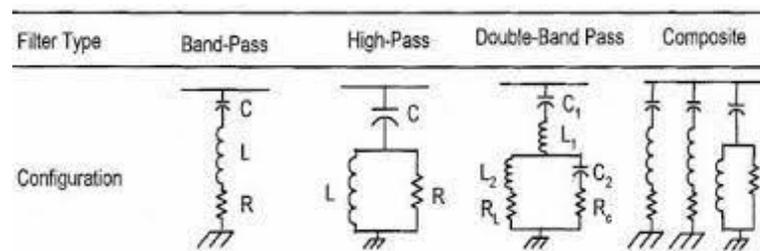
1. Filter Aktif

Filter aktif adalah perangkat yang terdiri dari rangkaian elektronika daya modern dan jauh lebih mahal dibandingkan filter pasif. Salah satu keuntungannya yang berbeda dari filter pasif adalah tidak beresonansi pada sistem.

2. Filter Pasif

Filter pasif merupakan solusi permasalahan harmonisa yang efektif dan juga ekonomis. Filter pasif ini tersusun dari induktansi, kapasitansi, dan resistansi, serta didesain untuk memberikan bagian khusus untuk mengalihkan arus harmonisa yang tidak diinginkan dalam sistem tenaga. Filter pasif banyak digunakan untuk mengompensasi kerugian daya reaktif akibat adanya harmonisa pada sistem yang terpasang dan biasanya digunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem.

Filter pasif ini mempunyai beberapa bentuk berdasarkan konfigurasi komponen penyusun. Gambar 16 di bawah ini menunjukkan rangkaian untuk masing-masing filter tersebut beserta konfigurasi dan impedansinya.



Gambar 16 Konfigurasi filter pasif. Sumber: Saputra, 2023. *Skripsi*

Berikut penjelasan untuk setiap jenis filter pasif yang ditunjukkan pada Gambar 16:

1. Filter pasif *single tuned (band-pass)* adalah susunan seri komponen pasif yang dihubungkan paralel dengan sistem, dan merupakan filter pasif yang hanya disetel tunggal untuk mereduksi arus harmonisa yang terdapat pada suatu orde tertentu. Filter ini memiliki rangkaian yang paling sederhana dibandingkan dengan filter pasif jenis yang lain.
2. *Double-band pass filter* atau filter ganda terdiri atas 2 komponen *single tuned filter* yang berada dalam kondisi paralel. Filter ini bekerja pada 2 orde yang telah ditentukan. Filter ini membutuhkan nilai kapasitor yang besar untuk mencapai performa yang sama seperti *single tuned filter* dan memiliki rugi-rugi daya tambahan pada resistor cukup besar.
3. *High-pass filter (HPF)* ini mereduksi harmonisa pada frkuensi tinggi dan tidak spesifik untuk harmonisa frekuensi rendah, serta memiliki rugi-rugi daya yang lebih besar dibandingkan *single tuned* dan *double tuned*. Selain itu HPF membutuhkan tambahan biaya terhadap kapasitor dan kemungkinan membutuhkan rangkaian pemutus.
4. Filter jenis *composite* ini merupakan gabungan dari beberapa jenis filter yang lain seperti *single tuned*, *high-pass*, dan atau *double-tuned*. Filter ini dapat mengurangi harmonisa pada beberapa frekuensi sekaligus atau dalam rentang yang lebih luas oleh karenanya filter ini memiliki biaya yang sangat besar dan desain yang sangat kompleks dibandingkan dengan filter jenis yang lain.

Diantara berbagai jenis konfigurasi filter pasif di atas, jenis filter pasif yang paling umum digunakan adalah *single-tuned filter* karena kesederhanaannya dalam desain, mudah dipasang, lebih ekonomis, dan memiliki efisiensi tinggi untuk menangani harmonisa pada frekuensi tertentu karena setiap filter hanya berfokus untuk mereduksi harmonisa di tiap orde.

Untuk merancang suatu filter pasif, ada beberapa hal yang harus diperhatikan, diantaranya:

1. Perlu diketahui besarnya kebutuhan daya pada sistem. Daya pada sistem ini diperlukan untuk menghitung besarnya nilai kapasitor yang diperlukan untuk memperbaiki sistem serta untuk meningkatkan faktor daya. Nilai tersebut dapat dicari menggunakan Persamaan (17) berikut (Dugan et al., 2004):

$$Q_C = \{P \tan (\cos^{-1}pf_1) - \tan (\cos^{-1}pf_2)\} \quad (17)$$

Keterangan:

Q_C = Daya reaktif kapasitor (kVAr)

P = Daya beban (kW)

pf_1 = Faktor daya pengukuran

pf_2 = Faktor daya diperbaiki

2. Setelah nilai daya reaktif diketahui, selanjutnya menentukan reaktansi kapasitif dan nilai kapasitansi, nilai tersebut dapat ditentukan dengan Persamaan (18) (Dugan et al., 2004):

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \quad (18)$$

Keterangan:

X_C = Reaktansi kapasitif (Ω)

V = Tegangan (V)

Nilai yang akan digunakan pada kapasitor dapat dihitung dengan Persamaan (19) (Dugan et al., 2004):

$$C = \frac{1}{2 \pi f_0 X_C} \quad (19)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi kapasitor (F)

f_0 = Frekuensi fundamental (Hz)

3. Kemudian menentukan nilai reaktansi induktif dan nilai induktansi untuk komponen filter, nilai tersebut dapat ditentukan dengan Persamaan (20) (Dugan et al., 2004):

$$L = \frac{1}{C (2\pi f_0 n)^2} \quad (20)$$

Keterangan:

L = Induktansi induktor (H)

n = Orde harmonisa ke-n yang akan difilter

Nilai yang akan digunakan pada induktor dapat dihitung dengan Persamaan (21) (Dugan et al., 2004):

$$X_L = 2\pi f_0 L \quad (21)$$

Keterangan:

$$X_L = \text{Reaktansi induktif } (\Omega)$$

4. Selanjutnya untuk menentukan besar nilai resistansi (R), maka yang perlu diketahui adalah nilai faktor kualitas Q dari filter. Nilai Q ini dapat ditentukan sendiri. Namun, pada umumnya nilai Q berkisar antara 40-100. Persamaan (22) berikut merupakan persamaan nilai resistansi (Dugan et al., 2004):

$$R = \frac{X_L}{Q} \quad (22)$$

Keterangan:

R = Resistansi filter (Ω)

Q = Faktor kualitas yang digunakan

2.5 ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*)

ETAP adalah perangkat lunak kompatibel yang dapat mendukung proses sistem tenaga listrik. Perangkat ini mampu bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan untuk mengendalikan sistem secara *real-time* (Lab Transmisi dan Distribusi, USU).

ETAP sangat berguna dalam menganalisis harmonisa. Terdapat *tool* untuk desain filter pasif, spektrum harmonisa, data THD dan IHD harmonisa, *library* harmonisa, dan *tool* yang lainnya dapat ditemukan pada *software* ini. Dengan penggunaan simulasi dihasilkan pemodelan dan analisa harmonisa dengan tepat. Dengan analisa harmonisa yang terdapat pada ETAP ini, memberikan tingkat keakuratan yang tinggi dengan memasukkan data secara terperinci. Program ini memiliki dua metode analisis yaitu *harmonics load flow* dan *frequency scan*, yang populer dengan pendekatan yang sangat kuat untuk sistem tenaga listrik. Dengan menggunakan dua metode tersebut, harmonisa yang berbeda akan dihitung dan dibandingkan dengan standar industri yang ada (*Power System Laboratory, ITS*).

Di dalam ETAP versi 19.0.1 terdapat beberapa jenis filter pasif yang dapat digunakan salah satunya yaitu jenis *Single Tuned Filter*. Jenis filter ini dapat mereduksi harmonisa dengan memasukkan nilai-nilai filter itu sendiri sesuai dengan kebutuhan harmonisa, sehingga sebelum merancang filter maka perlu untuk menganalisis harmonisa yang ada.

2.6 Penelitian Terdahulu yang Terkait

Dengan dilakukannya penelitian ini, penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan sangat penting sebagai referensi untuk menunjang pengembangan penelitian ini. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang memiliki relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan, antara lain:

1. Penelitian Elvira Zondra, Nofriandi, dan Masnur Putra Halilintar (2023) dengan judul “Analisis Pemasangan Filter Pasif untuk Mereduksi Harmonisa *Variable Speed Drive* di PT. IKPP Perawang”.

Penelitian ini menganalisis harmonisa VSD yang mengontrol motor induksi tiga fasa berkapasitas 160 kW yang menggerakkan *Green Liqour Pump-2* pada *boiler*. Hasil pengukuran menunjukkan kandungan harmonisa yang tinggi pada sisi sumber VSD tipe ACS800-07 saat kecepatan motor 1437 rpm. Kandungan harmonisa ditunjukkan oleh IHDi pada orde ke-5, 7 dan 11 dengan rata-rata adalah 38,7%, 15,3% dan 7,2%, dan THDi adalah 42,281%, yang berarti melebihi standarisasi IEEE 519-2014. Kemudian dilakukan pemasangan filter pasif *single tuned* menggunakan *software* Matlab/Simulink untuk mereduksi IHDi pada orde ke-5, 7 dan 11. Hasil simulasi filter pasif *single tuned* mampu mereduksi IHDi orde ke-5, 7 dan 11 menjadi 0,24%, 0,07% dan 0,03% dan THDi menjadi 0,61%, dan sudah memenuhi standar IEEE 519-2014.

2. Penelitian Tomy Nugroho dan Istoni Reza (2022) dengan judul “Analisis Pengukuran dan Perhitungan *Total Harmonic Distortion* (THD) pada Beban Non Linier”

Pengukuran dilakukan pada beban non linier yaitu motor induksi dengan daya 8,6 kW. Pengukuran dan perhitungan THD arus dan motor induksi diukur pada setiap fasanya. Hasil THD arus pada motor induksi sebesar 6,98% pada fasa R, 6,84% pada fasa S, 7,71% pada fasa T. Dari hasil yang telah diketahui THD arus pada motor induksi melebihi standar IEEE 519 karena standar IEEE 519 yaitu 5%. Untuk THD tegangan pada motor induksi sebesar 5% pada fasa R, 4,5% pada fasa S dan 4,4% pada fasa T, yang berarti masih di bawah standar yang ditentukan IEEE 519.

3. Penelitian I Nyoman Duarsana, I Wayan Rinas, dan I Wayan Arta Wijaya (2021) dengan judul “Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Phasa terhadap Pengaruh Harmonisa (THD) dengan Penambahan Filter Aktif menggunakan Matlab”

Penelitian ini bertujuan untuk meredam distorsi harmonisa menggunakan filter aktif yang disimulasikan pada *simulink software* Matlab. Penelitian ini berawal dari pembuatan model sistem untuk motor induksi 3 fasa, memasukkan data sistem, serta melakukan simulasi sebelum dan setelah pemasangan filter. Hasil analisa simulasi menggunakan Matlab menunjukkan filter aktif dapat menurunkan kandungan harmonisa pada jaringan. Penurunan yang terjadi pada THDi yaitu sebesar 11,88% pada fasa R, 11,87% pada fasa S dan 11,88% pada fasa T dengan beban 3 motor.

4. Penelitian oleh Mustamam, Marwan Affandi, dan Azmi Rizki Lubis (2019) dengan judul “Analisis dan Reduksi Harmonisa Arus pada Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan menggunakan *Single-tuned Passive Filter*”

Penelitian ini terfokus pada beban di gedung kampus (komersial). Hasil pengukuran menunjukkan nilai harmonisa arus melampaui standar dengan orde 3 sebesar 19,70% dan orde 13 sebesar 5,80%. Simulasi rangkaian *single tuned passive filter* menggunakan Matlab dengan *Fast Fourier Transform* (FFT) *analysis*. Hasil simulasi menunjukkan harmonisa arus orde 3 berkurang menjadi 3,91% dan harmonisa arus orde 13 menjadi 2,61%, hasil ini sudah berada di bawah batas standar yang diizinkan.

5. Penelitian oleh Prima Abdi Saputra (2023) dengan judul “Desain *Single Passive Tuned Filter* dalam Meredam Harmonisa pada Transformator UIN Suska Riau”

Penelitian ini terfokus pada distorsi harmonisa transformator. Hasil pengukuran pada trafo 1000 kVA UIN Suska Riau menunjukkan IHD yang terjadi pada orde ke-3 melebihi standar yakni 4% dan THD juga melebihi standar yakni 5%. Selanjutnya dilakukan perancangan *single passive tuned filter* menggunakan *software* ETAP.

Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan

| No | Penelitian Terdahulu | Persamaan | Perbedaan |
|----|--|---|---|
| 1 | Analisis pemasangan filter pasif untuk mereduksi harmonisa <i>variable speed drive</i> di PT. IKPP Perawang (Zondra et al., 2023) | Jenis filter yang digunakan adalah filter pasif | Pada penelitian ini menggunakan <i>software</i> Matlab, sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan <i>software</i> ETAP |
| 2 | Analisis pengukuran dan perhitungan <i>total harmonic distortion</i> (THD) pada beban non-linier (Nugroho & Reza, 2022) | Harmonisa pada beban motor induksi 3 fasa | Pada penelitian ini tidak ada solusi berupa filter yang dapat mereduksi harmonisa, sedangkan pada penelitian yang diajukan mencakup perancangan <i>single tuned passive filter</i> yang disimulasikan menggunakan <i>software</i> ETAP |
| 3 | Analisa unjuk kerja motor induksi 3 fasa terhadap pengaruh harmonisa (THD) dengan penambahan filter aktif menggunakan Matlab (Duarsana et al., 2021) | Harmonisa pada beban motor induksi 3 fasa | <ul style="list-style-type: none"> • Pada penelitian ini filter yang digunakan adalah filter aktif, sedangkan pada penelitian yang diajukan berupa filter pasif. • Pada penelitian ini menggunakan <i>software</i> Matlab, sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan <i>software</i> ETAP |
| 4 | Analisis dan reduksi harmonisa arus pada fakultas | Jenis filter yang digunakan adalah <i>single tuned passive filter</i> | • Pada penelitian ini yang dianalisis berupa beban komersial (beban kampus) sedangkan pada penelitian |

| No | Penelitian Terdahulu | Persamaan | Perbedaan |
|----|---|---|---|
| | teknik universitas negeri medan menggunakan <i>singletuned passive filter</i> (Mustamam et al., 2019) | | yang diajukan berupa beban motor induksi 3 fasa dengan <i>variable frequency drive</i> (VFD) <ul style="list-style-type: none"> • Pada penelitian ini menggunakan <i>software</i> Matlab, sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan <i>software</i> ETAP |
| 5 | Desain <i>single passive tuned filter</i> dalam meredam harmonisa pada transformator UIN Suska Riau (Saputra, 2023) | <ul style="list-style-type: none"> • <i>Software</i> yang digunakan adalah ETAP • Jenis filter yang digunakan adalah <i>single tuned passive filter</i> | Pada penelitian ini pengukuran pada transformator sedangkan pada penelitian yang diajukan pada motor induksi 3 fasa dengan <i>variable frequency drive</i> (VFD) |