



Perancangan Panel Kontrol Pengendali Kecepatan Motor Induksi AC 3 Fasa dengan Menggunakan VSD NVF5

Fernando Juliansyah^{1*}, Mohammad Fatkhurrohman²

¹⁻² Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

*Penulis Korespondensi: fernandojuliansyah222@gmail.com

Abstract. *Three-phase induction motors are the primary drive components in various modern industrial systems demanding high energy efficiency and operational reliability. However, conventional speed control methods have proven to waste electrical power and are less adaptive to dynamic load changes. Therefore, this study aims to design and fabricate an integrated speed control panel for a 3-phase AC induction motor utilizing a Chint NVF5-3.7/TS4-B Variable Speed Drive (VSD). In contrast to qualitative approaches, this research applies an applied quantitative methodology based on engineering design, validated through a literature review and empirical observations at PT. Tiga Kreasi Indonesia, Tangerang Regency. The panel prototype was precisely fabricated with dimensions of 800 × 550 × 300 mm, using 2 mm thick steel plates coated with RAL 7035 paint, and complies with the IP42 protection standard. Its electrical architecture is integrated into four main subsystems: incoming, inverter, outgoing, and manual control system. Operational testing results validate that the VSD effectively regulates rotor rotation linearly against its output frequency, yielding measured speeds of 1,713 rpm at 35 Hz and 2,709 rpm at 50 Hz. Although the empirical evaluation revealed an escalation in slip value during low-frequency operations due to flux weakening, comprehensively, the implementation of this VSD control panel is proven reliable in regulating speed and possesses a highly significant potential for reducing power consumption compared to conventional Direct on Line (DOL) operations.*

Keywords: 3-Phase Induction Motor; Chint NVF5; Control Panel; Energy Efficiency; Variable Speed Drive.

Abstrak. Motor induksi tiga fasa merupakan komponen penggerak utama dalam berbagai sistem industri modern yang menuntut efisiensi energi dan keandalan operasional yang tinggi. Namun, pengendalian kecepatan secara konvensional terbukti memboroskan daya listrik dan kurang adaptif terhadap dinamika perubahan beban. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan merancang bangun panel kontrol kecepatan motor induksi AC 3 fasa terintegrasi menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD) tipe Chint NVF5-3.7/TS4-B. Berbeda dengan pendekatan kualitatif, penelitian ini mengaplikasikan metode kuantitatif terapan berbasis perancangan teknik (*engineering design*) yang divalidasi melalui studi literatur dan observasi empiris di PT. Tiga Kreasi Indonesia, Kabupaten Tangerang. Purwarupa panel difabrikasi secara presisi dengan dimensi 800 × 550 × 300 mm, menggunakan pelat baja 2 mm berlapis cat RAL 7035, dan telah memenuhi standardisasi proteksi IP42. Arsitektur kelistrikkannya diintegrasikan ke dalam empat subsistem pokok: *incoming*, *inverter*, *outgoing*, dan sistem kontrol manual. Hasil pengujian operasional memvalidasi bahwa VSD efektif meregulasi putaran rotor secara linier terhadap frekuensi keluaran; menghasilkan kecepatan terukur 1.713 rpm pada titik 35 Hz dan 2.709 rpm pada 50 Hz. Walaupun evaluasi menemukan eskalasi nilai *slip* pada frekuensi rendah akibat pelemahan fluks, secara komprehensif implementasi panel kendali VSD ini terbukti andal dalam meregulasi kecepatan dan memiliki potensi penghematan konsumsi daya yang sangat signifikan dibandingkan operasi *Direct on Line* (DOL) konvensional.

Kata kunci: Chint NVF5; Efisiensi Energi; Motor Induksi 3 Fasa; Panel Kontrol; *Variable Speed Drive*.

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Sektor industri modern sangat bergantung pada motor induksi tiga fasa sebagai penggerak utama pada berbagai mesin esensial, seperti pompa, kompresor, konveyor, dan kipas sentrifugal. Motor jenis ini menjadi pilihan utama karena menawarkan konstruksi mekanis yang kokoh, tingkat keandalan operasi yang tinggi, biaya perawatan yang ekonomis, serta efisiensi operasional yang lebih baik dibandingkan dengan motor DC konvensional (Evalina et al., 2018). Motor induksi ini didesain untuk beroperasi secara optimal menggunakan suplai

tegangan utama satu atau tiga fasa (Laili et al., 2023). Untuk beban skala besar, motor ini terbukti mampu menghasilkan torsi mekanis yang stabil dan efisiensi konversi energi yang tinggi (Hanifah & Yuhendri, 2023).

Kendati demikian, pengoperasian konvensional memiliki kelemahan teknis yang cukup fatal. Saat motor pertama kali dihidupkan, arus mula (*inrush current*) dapat melonjak ekstrem, yang berisiko mengganggu stabilitas jaringan listrik dan mempercepat degradasi pada isolasi belitan stator. Selain itu, menjalankan motor pada kecepatan penuh secara terus-menerus (*fixed speed*) padahal beban kerja sedang menurun akan menimbulkan pemborosan energi listrik yang sangat signifikan (Atmam et al., 2018).

Sebagai pemecahan masalah tersebut, *Variable Speed Drive* (VSD) diimplementasikan untuk mengatur frekuensi secara kontinu. Arsitektur VSD bekerja melalui tiga proses berkesinambungan: modul *rectifier* menyearahkan tegangan AC, *DC bus* meratakan tegangan, dan modul *inverter* mengubah kembali arus DC menjadi AC dengan frekuensi serta amplitudo yang dapat diatur. Proses inversi ini dikendalikan oleh komponen semikonduktor IGBT melalui teknik *Pulse Width Modulation* (PWM) (Wirawan et al., 2017). Peningkatan frekuensi pembawa pada *inverter* ini dapat mereduksi kandungan harmonik dan meningkatkan kualitas daya gelombang yang diterima motor (Firnando et al., 2022). Gelombang keluaran yang dihasilkan terbukti cukup secara praktis untuk menggerakkan motor standar (Ta'ali & Eliza, 2020). Lebih dari itu, VSD memungkinkan pembalikan arah putar motor secara elektronik tanpa intervensi fisik pada panel (Surya & Kartadinata, 2017).

Efisiensi energi dari penggunaan VSD telah dibuktikan oleh berbagai penelitian terdahulu. Kajian Atmam et al. (2018) menunjukkan adanya reduksi konsumsi energi listrik secara signifikan. Sementara itu, penelitian Firnando et al. (2022) menganalisis pengaruh perubahan beban terhadap arus, dan Hartono & Nurcahyo (2017) secara khusus meneliti efisiensi *inverter* pada skala laboratorium. Akan tetapi, mayoritas studi tersebut hanya berfokus pada analisis performa tanpa merancang integrasi sistem kendali dalam sebuah panel industri yang terproteksi.

Berangkat dari celah penelitian tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) berupa rancang bangun panel kontrol yang terintegrasi secara penuh menggunakan VSD tipe Chint NVF5-3.7/TS4-B. Panel kelistrikan ini difabrikasi dengan tingkat proteksi IP42 untuk menjamin ketahanannya di lingkungan pabrik. Sistem panel ini memusatkan seluruh antarmuka kendali dan proteksi beban operasional motor ke dalam satu selungkup yang ringkas, aman, dan mudah dioperasikan secara lokal oleh teknisi di lapangan.

2. KAJIAN TEORITIS

Motor Induksi

Motor induksi adalah perangkat listrik yang bertugas mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros. Motor ini termasuk ke dalam klasifikasi motor arus bolak-balik (AC). Dari dua varian utama motor AC (sinkron dan asinkron), motor induksi digolongkan sebagai motor asinkron atau tidak serempak. Penamaan ini diberikan karena kecepatan putaran aktual pada poros motor tidak pernah sama persis dengan kecepatan putar medan fluks magnetik di bagian stator. Adanya selisih putaran antara rotor dengan medan fluks magnetik tersebut dikenal dengan istilah *slip* (Harahap et al., 2023). Secara teoretis, kecepatan putar motor induksi ditentukan oleh persamaan:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

Berdasarkan parameter persamaan tersebut, pengaturan kecepatan motor berbanding lurus dengan frekuensi suplai (f).

Inverter

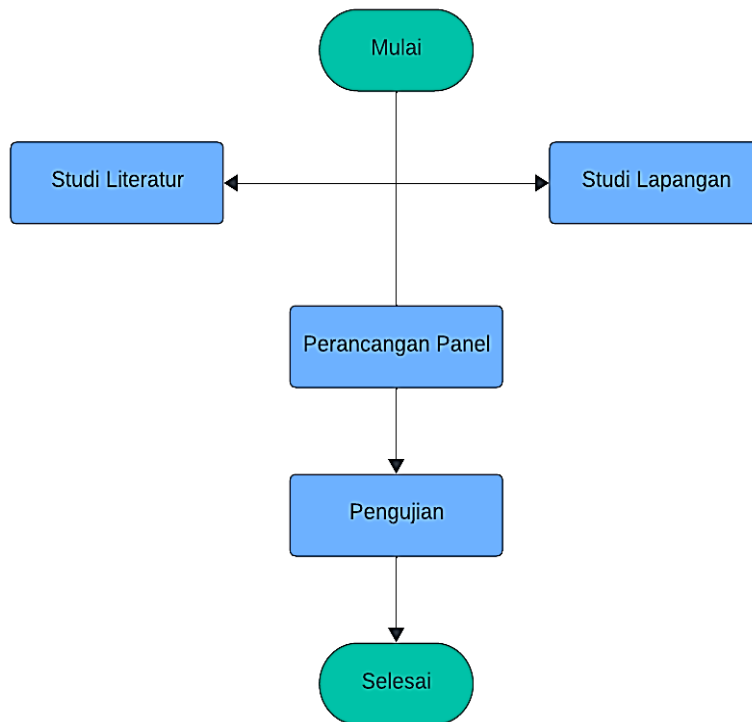
Inverter adalah rangkaian elektronika daya yang bertugas mengonversi arus listrik searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Perangkat konversi ini secara luas diimplementasikan pada berbagai sistem kelistrikan esensial, mulai dari pengendali kecepatan motor induksi, *Uninterruptible Power Supplies* (UPS), filter daya aktif, hingga *Flexible AC Transmission Systems* (FACTS). Sistem operasi inverter pada umumnya dikendalikan melalui metode *Pulse Width Modulation* (PWM). Terdapat beberapa variasi teknik PWM yang dapat diaplikasikan, antara lain *Single-Pulse Width Modulation*, *Multiple-Pulse Width Modulation* (MPWM), dan *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Khusus pada topologi inverter tiga fasa, sistem membutuhkan enam buah sinyal PWM untuk mengaktivasikan enam komponen sakelar (*switching*) semikonduktornya. Mekanisme penyaklaran ini bekerja secara bergantian; sebagai contoh, aktivasi pada transistor 1 atau transistor 4 akan menentukan arah sambungan terminal fasa keluaran terhadap kutub sumber DC (Muhammad et al., 2022).

Variable Speed Drive (VSD)

Variable Speed Drive (VSD) atau *Variable Frequency Drive* (VFD) merupakan instrumen elektronika daya yang berfungsi untuk meregulasi kecepatan putaran motor listrik bolak-balik (AC). Pengendalian ini dieksekusi secara presisi melalui manipulasi frekuensi suplai kelistrikan yang didistribusikan menuju motor. Penggunaan perangkat ini kian masif di sektor industri berkat keandalannya dalam mengontrol unjuk kerja motor induksi. Secara teknis, putaran rotor diregulasi oleh VSD dengan cara mengonversi frekuensi masukan dari

jaringan utama (*grid*) menjadi frekuensi keluaran yang variabel di sisi beban. Transformasi daya inilah yang memungkinkan mesin untuk beradaptasi mencapai titik kecepatan yang ditargetkan secara responsif (Tanjung & Zulfahri, 2018).

3. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Alur Penelitian.

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) atau eksperimen terapan dengan pendekatan perancangan teknik (*engineering design*), yang dilanjutkan dengan analisis data secara kuantitatif. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang, merakit, serta menguji kelayakan operasional *prototype* panel kontrol kecepatan motor induksi AC 3 fasa. Pengumpulan data dilakukan melalui dua tahap pokok. Pertama, studi literatur dengan mengkaji berbagai referensi jurnal kelistrikan untuk mendapatkan landasan teori yang valid terkait pengaturan frekuensi VSD. Kedua, observasi lapangan secara langsung di area produksi PT. Tiga Kreasi Indonesia, Kabupaten Tangerang. Observasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa spesifikasi panel yang dirancang benar-benar aplikatif dan memenuhi standar kelistrikan industri.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui dua tahap pokok. Pertama, studi literatur dengan mengkaji berbagai jurnal mengenai pengaturan frekuensi dan elektronika daya untuk

mendapatkan parameter teknis yang tepat. Kedua, observasi lapangan dan pendataan langsung di area produksi PT. Tiga Kreasi Indonesia, Kabupaten Tangerang. Langkah observasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa spesifikasi panel yang dirancang benar-benar aplikatif dan memenuhi standar industri kelistrikan yang berlaku.

Tahapan perancangan panel meliputi: (1) pembuatan gambar konstruksi (*drawing*) panel secara tiga dimensi mencakup tampak atas, depan, samping, dan bawah; (2) pembuatan diagram pengawatan (*wiring diagram*) yang merepresentasikan hubungan listrik antarkomponen secara sistematis; (3) perakitan panel secara fisik berdasarkan rancangan yang telah dibuat; dan (4) pengujian fungsional panel untuk memverifikasi unjuk kerja sistem kendali kecepatan.

Pada tahap pengujian eksperimental, panel kontrol disuplai dengan tegangan masukan (*incoming*) sebesar 380 V. Sisi keluaran VSD (*outgoing*) dihubungkan langsung ke beban berupa motor induksi AC 3 fasa yang memiliki spesifikasi 2 kutub ($P = 2$). Parameter yang diamati dalam pengujian ini adalah frekuensi keluaran VSD sebagai variabel bebas, dan kecepatan aktual putaran rotor (n_r) sebagai variabel terikat yang diukur menggunakan takometer optik.

Mengingat adanya batasan operasional dan waktu produksi di lapangan, pengambilan sampel data difokuskan pada dua titik frekuensi, yaitu 35 Hz dan 50 Hz. Data kecepatan yang terukur kemudian dianalisis dengan cara membandingkannya terhadap nilai kecepatan sinkron teoritis (n_s). Selisih dari perbandingan ini digunakan untuk menghitung persentase slip, yang akan menjadi tolok ukur kestabilan kinerja sistem kendali VSD yang telah dirancang.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesifikasi dan Pemilihan *Variable Speed Drive*

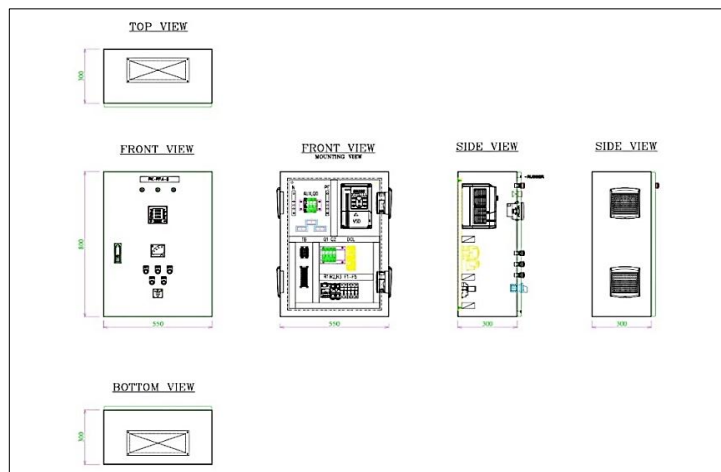
Komponen penggerak utama dalam perancangan ini menggunakan *Variable Speed Drive* (VSD) seri Chint NVF5-3.7/TS4-B. Instrumen ini dirancang untuk kapasitas daya 3,7 kW dengan arus nominal 10,5 A, serta sanggup beroperasi secara stabil pada rentang tegangan suplai tiga fasa 380 V hingga 440 V. Frekuensi keluaran VSD ini sangat fleksibel, dapat diatur mulai dari 0 hingga 400 Hz, yang jauh melampaui frekuensi standar jaringan PLN. Keunggulan teknis dari perangkat ini terletak pada toleransi beban lebihnya (*overload*), yang mampu menahan 150% arus nominal selama satu menit dan hingga 180% selama dua detik. Kapasitas ini sangat vital untuk mengamankan sistem dari lonjakan arus mula saat motor dihidupkan. Pemilihan instrumen ini juga didasarkan pada kepatuhannya terhadap standar keamanan kelistrikan internasional, seperti IEC 61800-5-1 dan IEC 61800-3.

Konstruksi Mekanis dan Arsitektur Panel Kontrol



Gambar 2. VSD Chint NVF5-3.7/TS4-B.

Secara fisik, seluruh rangkaian kendali diintegrasikan ke dalam sebuah kotak panel (*enclosure*) berbahan pelat baja setebal 2 mm, dengan dimensi ruang 800 x 550 x 300 mm. Permukaan panel dilapisi dengan *finishing* cat berwarna abu-abu terang (RAL 7035). Desain panel ini telah memenuhi sertifikasi proteksi IP42, yang memastikan perangkat di dalamnya aman dari gangguan benda padat berdiameter di atas 1 mm dan terlindungi dari percikan air vertikal dengan kemiringan hingga 15°. Spesifikasi ini sangat memadai untuk instalasi di dalam ruangan (*indoor*) pabrik.



Gambar 3. Konstruksi Panel Kontrol Motor AC 3 Fasa.

Arsitektur kelistrikan panel didistribusikan secara hierarkis ke dalam empat subsistem pokok:

- a. Jalur Masukan (*Incoming*): Menerima suplai daya utama tiga fasa. Subsistem ini diamankan oleh *Miniature Circuit Breaker* (MCB) tiga fasa 16A berkapasitas pemutus 10 kA, yang dilengkapi dengan kontak bantu untuk keperluan *monitoring* status arus.

- b. Modul *Inverter*: Merupakan subsistem inti yang berisi VSD Chint NVF5, kontaktor utama, *Thermal Overload Relay* (TOR) 5,5-8A, beserta instrumen antarmuka seperti tombol tekan, lampu indikator, dan selektor mode operasi.
- c. Jalur Keluaran (*Outgoing*): Jalur yang bertugas menyalurkan daya kelistrikan langsung menuju beban, yakni motor induksi AC 3 fasa.
- d. Subsistem Kontrol: Terdiri dari instrumen pemantau parameter daya (tipe HFPM-96F), tiga unit trafo arus (CT), sistem sekering pengaman, dan dua kipas ventilasi tambahan untuk mendisipasi panas keluar dari dalam panel.

Wiring Diagram

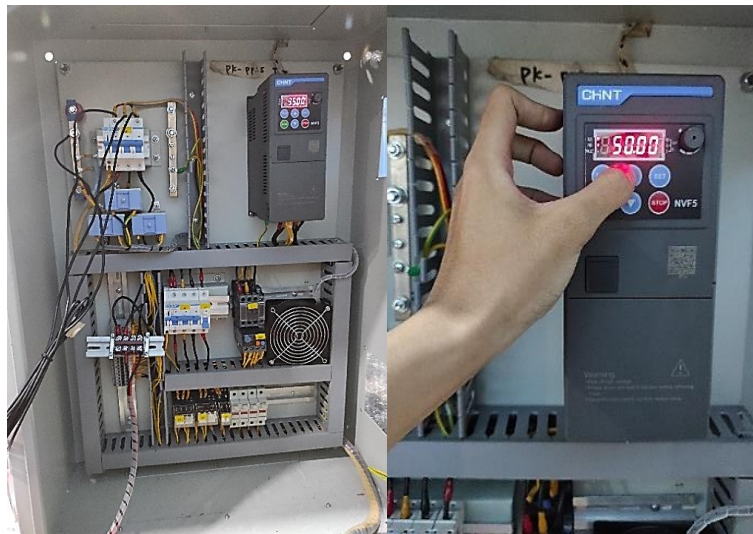
Konfigurasi *wiring* kelistrikan panel dirancang dengan alur yang logis. Terminal L1, L2, dan L3 pada modul VSD menerima suplai dari jalur masukan, sedangkan terminal U, V, dan W langsung dihubungkan menuju motor 3 fasa. Sistem kendali panel difokuskan pada pengoperasian lokal. Pengaturan nilai frekuensi untuk meregulasi kecepatan putar motor dieksekusi secara manual melalui *keypad* bawaan pada unit VSD. Sementara itu, instruksi operasional untuk menghidupkan dan mematikan sistem dikendalikan melalui tombol tekan (*push button*) yang terintegrasi di pintu panel. Logika proteksi diatur melalui rantai tiga relai (R1, R2, R3) yang saling terhubung silang untuk memberikan sinyal *start*, status *running*, serta memicu alarm lampu indikator secara otomatis apabila sistem mendeteksi gangguan (*fault*).

Hasil Perakitan Panel

Panel yang telah dirakit menunjukkan kerapian pemasangan komponen sesuai gambar konstruksi. Tampak dalam panel memperlihatkan penempatan VSD pada posisi tengah-atas untuk memudahkan pendinginan udara, MCB dan kontaktor di sisi kiri, serta blok terminal dan pengkabelan yang tersusun rapi pada bagian bawah. Tampak luar panel menunjukkan antarmuka kontrol dengan lampu indikator tiga warna, selektor mode, tombol tekan, dan tampilan pemantau daya yang mudah diakses oleh operator.

Panel ini mendukung dua mode operasi: mode manual dan mode otomatis. Pada mode manual, operator menghidupkan dan mematikan motor melalui tombol tekan ON/OFF. Pada mode otomatis, sinyal analog dari transmiter tekanan diferensial dikirimkan ke terminal masukan analog VSD (AI2-GND); VSD kemudian menyesuaikan frekuensi keluarannya secara proporsional terhadap nilai sinyal tersebut, sehingga kecepatan motor berubah secara adaptif mengikuti perubahan tekanan proses tanpa campur tangan operator. Fitur ini sangat relevan untuk aplikasi sistem HVAC, pompa sirkulasi, dan kipas industri yang beban kerjanya berfluktuasi secara kontinu.

Hasil Pengujian dan Analisis



Gambar 4. Proses Pengujian Panel.

Pengujian fungsional dilakukan dengan mengatur frekuensi keluaran VSD pada dua titik pengukuran, yaitu 35 Hz dan 50 Hz. Hasil pengukuran kecepatan putaran motor disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Hasil Pengujian.

Frekuensi (Hz)	Kecepatan Putaran Motor (rpm)
35	1713
50	2709

Validasi fungsional dieksekusi dengan mengukur putaran motor pada dua titik pengaturan frekuensi VSD, yakni 35 Hz dan 50 Hz. Hasil perekaman data menggunakan takometer menunjukkan bahwa kecepatan rotor berada di angka 1.713 rpm pada 35 Hz, dan terekskalasi menjadi 2.709 rpm pada 50 Hz. Data empiris ini mengonfirmasi prinsip fundamental motor induksi, di mana kecepatan putar mekanis berbanding lurus secara linier dengan frekuensi suplai kelistrikkannya (Hughes & Drury, 2022; Bose, 2021).

Berdasarkan analisis teoretis untuk motor 2 kutub ($P = 2$), terdapat deviasi antara kecepatan aktual yang diukur dengan kecepatan sinkronnya. Kalkulasi menunjukkan adanya persentase slip sebesar 9,7% pada frekuensi 50 Hz, yang kemudian melonjak menjadi 18,4% pada 35 Hz. Eskalasi nilai slip pada operasi frekuensi rendah ini adalah fenomena yang terjadi akibat pelemahan torsi, karena rasio tegangan terhadap frekuensi (V/f) tidak mendapat kompensasi secara optimal. Kondisi ini umum terjadi pada sistem penggerak motor berbasis inverter ketika tidak diterapkan voltage boost pada frekuensi rendah (Bimal K. Bose, 2021; Vas, 2020; Krishnan, 2022). Hal ini menjadi catatan analitis penting untuk mengoptimalkan pengaturan kurva tegangan (boost) pada VSD untuk keperluan industri (Singh & Verma, 2023).

Secara keseluruhan, regulasi kecepatan berbasis VSD ini mengeliminasi pemborosan energi. Sesuai dengan hukum afinitas (*affinity laws*) untuk beban sentrifugal, daya yang dikonsumsi oleh motor sebanding dengan pangkat tiga dari putarannya ($P \propto n^3$). Dengan menurunkan frekuensi operasi ke 35 Hz, konsumsi listrik secara matematis dapat ditekan secara drastis dibandingkan jika motor terus-menerus dioperasikan pada frekuensi penuh jaringan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan mekanis dan pengujian operasional, penelitian ini berhasil memvalidasi purwarupa panel kontrol pengendali kecepatan motor induksi AC 3 fasa yang ditenagai oleh instrumen VSD Chint NVF5-3.7/TS4-B. Dari proses evaluasi kuantitatif tersebut, dapat ditarik beberapa simpulan empiris sebagai berikut:

- a. Secara perangkat keras, panel yang difabrikasi menggunakan pelat setebal 2 mm dengan dimensi $800 \times 550 \times 300$ mm dan *finishing* cat RAL 7035 telah terbukti beroperasi secara optimal. Sertifikasi proteksi standar IP42 pada selungkup panel ini menjamin keandalan dan keamanan sistem kelistrikan untuk diaplikasikan pada lingkungan pabrik dalam ruangan (*indoor*).
- b. Modul VSD yang diintegrasikan terbukti mampu mengatur regulasi kecepatan rotor secara presisi melalui manipulasi frekuensi keluaran. Pengukuran empiris mengonfirmasi eskalasi putaran mekanis yang proporsional, yakni dari 1.713 rpm pada titik 35 Hz menjadi 2.709 rpm pada titik 50 Hz. Temuan ini konsisten dan memvalidasi teori fundamental mengenai kecepatan sinkron pada motor induksi.
- c. Jika dikomparasikan dengan metode konvensional (operasi pada kecepatan tetap), implementasi kontrol VSD ini menawarkan potensi penghematan energi listrik yang jauh lebih masif. Optimalisasi daya ini akan terasa sangat signifikan saat diaplikasikan pada karakteristik beban sentrifugal, yang secara termodinamika mengikuti hukum afinitas (*affinity laws*).

Saran

Mengacu pada hasil pengujian panel di lapangan, ada beberapa saran perbaikan teknis dan penambahan instrumen yang direkomendasikan untuk penyempurnaan alat ke depannya:

- a. Panel kontrol ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan *Programmable Logic Controller* (PLC) dan layar *Human-Machine Interface* (HMI). Penggunaan PLC dapat menggantikan sistem kontrol relai konvensional, sehingga panel bisa benar-benar beroperasi secara otomatis (*closed-loop*). Dengan tambahan

- alat ini, pembacaan sensor fisik di lapangan (seperti sensor tekanan atau pembaca RPM) dapat langsung diolah oleh PLC untuk mengatur naik-turunnya frekuensi VSD secara presisi menggunakan program PID.
- b. Mengingat modul VSD bekerja menggunakan proses *switching* berkecepatan tinggi yang rentan menghasilkan gangguan harmonisa, sangat disarankan untuk memasang komponen *AC Line Reactor (choke)* pada jalur masukan (*incoming*). Perangkat keras tambahan ini sangat berguna untuk meredam gangguan harmonisa pada sistem kelistrikan, sekaligus melindungi komponen *inverter* dari lonjakan tegangan yang tiba-tiba.
 - c. Kipas ventilasi (*exhaust fan*) pada panel akan jauh lebih optimal jika dihubungkan dengan modul termostat pengatur suhu. Dengan adanya sensor suhu ini, kipas tidak perlu menyala terus-menerus. Kipas hanya akan menyala secara otomatis ketika suhu di dalam panel sudah mulai panas atau melewati batas setelan. Penambahan komponen sederhana ini terbukti bisa lebih menghemat listrik dan memperpanjang umur pakai kipas tersebut.

DAFTAR REFERENSI

- Atmam, T., Tanjung, A., & Zulfahri. (2018). Analisis penggunaan energi listrik motor induksi tiga fasa menggunakan variable speed drive (VSD). *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 2(2), 52–59.
- Bose, B. K. (2021). *Power electronics and motor drives: Advances and trends* (2nd ed.). Academic Press.
- Evalina, N., Azis, A., & Zulfikar, Z. (2018). Pengaturan kecepatan putaran motor induksi 3 fasa menggunakan programmable logic controller. *JET (Journal of Electrical Technology)*, 3(2), 73–80.
- Firnando, V., Primar, & Hamri, S. (2022). Analisis perubahan beban terhadap arus listrik pada motor induksi 3 fasa dengan kendali VSD di Laboratorium Center of Excellence SMK Negeri 1 Rejang Lebong. *Jurnal Teknik Elektro Raflesia*, 2(1), 1–5.
- Hanifah, F., & Yuhendri, M. (2023). Kontrol dan monitoring kecepatan motor induksi berbasis Internet of Things. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 4(2), 519–528.
- Harahap, C. R., Nasution, R. A., & Setyawan, F. A. (2023). Pengendalian kecepatan motor induksi 3 fasa dengan sumber panel surya. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 11(3). <https://doi.org/10.23960/jitet.v11i3.3424>
- Hughes, A., & Drury, B. (2022). *Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Krishnan, R. (2022). *Electric motor drives: Modeling, analysis, and control*. Pearson.

- Laili, M. N., Bagaskoro, M. C., Gumilar, L., Faiz, M. R., & Aripriharta. (2023). Perancangan kendali motor induksi menggunakan variable speed drive. *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 8(1), 1–6.
- Muhammad, R., Septiyanto, D., & Mulyono, N. (2022, August). Rancang bangun inverter 3 fasa berbasis bipolar sinusoidal pulse width modulation. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar* (Vol. 13, No. 01, pp. 1419–1424).
- Singh, B., & Verma, V. (2023). Performance analysis of V/f controlled induction motor drive under low-frequency operation. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 14(2), 987–995. <https://doi.org/10.11591/ijped.v14.i2.pp987-995>
- Surya, H. H., & Kartadinata, B. (2017). Kendali kecepatan motor crane terhadap sumbu vertikal menggunakan distributed control system (DCS). *Jurnal Elektro*, 10(1), 15–28.
- Ta'ali, & Eliza, F. (2020). Sistem monitoring dan kontrol motor AC berbasis SCADA. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia*, 1(1), 15–20.
- Tanjung, A., & Zulfahri. (2018). Analisis penggunaan energi listrik motor induksi tiga fasa menggunakan variable speed drive (VSD). *SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi, dan Industri*, 2(2), 52–59.
- Vas, P. (2020). *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford University Press.
- Wirawan, F. J., Lomi, A., & Hartono, B. P. (2017). Implementasi LCL filter dalam mereduksi harmonisa akibat penggunaan VSD (variable speed drive) untuk meningkatkan kualitas daya dan efisiensi energi. *Magnetika: Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro*, 1(1), 1–7.