TUGAS AKHIR

EFEKTIVITAS KINERJA MOTOR TIGA FASA KOMPRESOR REFRIGERANT DENGAN PENERAPAN INVERTER VARIABLE FREQUENCY DRIVE DI INDUSTRI PENDINGIN

Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyahsumatera Utara

Disusun Oleh :

ILHAM WAHYUDI
2207220001

UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN

2026

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini di ajukan oleh :

Nama	: Ilham Wahyudi
NPM	: 2207220001
Program Study	: Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Efektivitas Kinerja Motor Tiga Fasa Kompresor Refrigerant Dengan Penerapan Inverter Variable Frequency Drive Di Industri Pendingin
Bidang ilmu	: Sistem Kontrol

Telah berhasil di pertahankan di hadapan penguji dan di terima sebagai salah satu syarat yang di perlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 15 September 2026

Mengetahui dan Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Benny Oktrialdi S.T.,M.T.

Dosen Pembanding I/penguji

Dr. Faisal Irsan Pasaribu, S.T, M.T

Dosen Pembanding II/Penguji

Dr. Elvy Sahnur Nasution,S.T.,M.Pd

Program Study Teknik Elektro

Ketua

Dr. Elvy Sahnur Nasution,S.T.,M.Pd

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama Lengkap	: Ilham Wahyudi
Tempat/Tanggal Lahir	: Medan / 15 Maret 2004
NPM	: 2207220001
Fakultas	: Teknik
Program Study	: Teknik elektro

Menyatakan Dengan Sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul

“ Efektivitas Kinerja Motor Tiga Fasa Kompresor Refrigant Dengan Penerapan Inverter Variable Frequency Drive Di Industri Pendingin”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non material,ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis tangan Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari di duga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia di proses oleh tim fakultas yang di bentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan kesadaran diri dan tidak atas paksaan ataupun tekanan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Study Teknik Elektro,Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Medan 15 September 2026

Saya Yang Menyatakan



ILHAM WAHYUDI

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas pada kinerja motor listrik tiga fasa yang digunakan sebagai penggerak kompresor refrigerant dengan penerapan Inverter Variable Frequency Drive (VFD) di industri pendingin. Penggunaan VFD memungkinkan pengaturan frekuensi dan kecepatan motor secara fleksibel sesuai kebutuhan beban pendinginan sehingga diharapkan dapat meningkatkan performa sistem serta mengoptimalkan konsumsi energi listrik. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental dengan melakukan pengujian variasi frekuensi VFD sebesar 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, dan 50 Hz. Parameter yang diamati meliputi kecepatan sinkron motor, daya listrik yang digunakan, waktu pencapaian suhu ruangan, laju penurunan suhu, serta indeks efektivitas energi. Perhitungan kecepatan sinkron dilakukan menggunakan persamaan $N_s = \frac{120f}{P}$, sedangkan analisis efektivitas energi diperoleh dari perbandingan antara laju penurunan suhu terhadap daya listrik yang dikonsumsi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi VFD berbanding lurus dengan kenaikan kecepatan motor dan daya listrik. Pada frekuensi 50 Hz diperoleh kecepatan sinkron sebesar 3000 rpm dengan daya sekitar 198 kW serta laju penurunan suhu sebesar 12,5 °C/jam. Nilai indeks efektivitas tertinggi juga diperoleh pada frekuensi 50 Hz sebesar 0,063 °C/kW·jam. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan frekuensi menggunakan VFD mampu meningkatkan kinerja sistem pendingin secara optimal dan memberikan efisiensi operasional yang lebih baik. Dengan demikian, penerapan VFD pada motor tiga fasa kompresor refrigerant terbukti efektif dalam meningkatkan kontrol kecepatan, kestabilan suhu, serta efisiensi energi pada industri pendingin.

Kata kunci: Motor tiga fasa, VFD, efisiensi energi, kompresor refrigerant, industri pendingin.

ABSTRACK

This study aims to analyze the effectiveness of a three-phase electric motor used as a refrigerant compressor drive with the implementation of a Variable Frequency Drive (VFD) in a refrigeration industry. The application of a VFD enables flexible control of motor frequency and speed according to cooling load requirements, thereby improving system performance and optimizing electrical energy consumption. The research method used was an experimental approach by testing several VFD frequency variations of 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, and 50 Hz. The observed parameters included motor synchronous speed, electrical power consumption, room temperature achievement time, cooling rate, and energy effectiveness index. The synchronous speed was calculated using the equation $N_s = \frac{120f}{P}$*, while the energy effectiveness analysis was determined from the ratio between the cooling rate and electrical power consumption. The results show that increasing VFD frequency is directly proportional to the increase in motor speed and electrical power consumption. At 50 Hz, the synchronous speed reached 3000 rpm with a power consumption of approximately 198 kW and a cooling rate of 12.5 °C/hour. The highest effectiveness index was also obtained at 50 Hz, with a value of 0.063 °C/kW·hour. This indicates that frequency control using VFD significantly improves refrigeration system performance and operational energy efficiency. Therefore, the implementation of a VFD on a three-phase motor driving a refrigerant compressor has proven to be effective in enhancing speed control, temperature stability, and energy efficiency in refrigeration industries.*

Keywords:*Three-phase motor, VFD, energy efficiency, refrigerant compressor, refrigeration industry.*

KATA PENGANTAR

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi maha penyayang. Segala puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, yang telah menetapkan segala sesuatu dengan sempurna, sehingga tiada sehelai daun pun yang jatuh tanpa izinnya. Alhamdulliah, atas rahmat dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul "EFEKTIFITAS KINERJA MOTOR TIGA FASA KOMPRESOR REFRIGERANT DENGAN PENERAPAN INVERTER VARIABLE FREQUENCY DRIVE DI INDUSTRI PENDINGIN" sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatra Utara (UMSU), Medan.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, selam proses penyusunan skripsi ini. Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd. selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatra utara.
2. Ir. Ade Faisal, S.T, M.Sc, Ph.D, selaku Dekan Fakultas Teknik, Universtas Muhammadiyah Sumatra Utara.
3. Dr. Khairul Umurani, S.T, M.T, selaku Wakil Dekan 1 Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatra utara.
4. Bapak Affandi, S.T., M.T, selaku Wakil Dekan III Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatra Utara.
5. Ibu Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T, M.Pd, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatra Utara.
6. Bapak Benny Oktrialdi, S.T, M.T, Selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro dan sekaligus sebagai pembimbing saya.
7. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sumatra Utara, atas ilmu yang sangat bermanfaat selama masa perkuliahan.

8. Ayahanda Almarhum Adrianto, Ibunda Dewi Arsih, Terima kasih atas doa, nasihat, dan kasih sayang yang tiada habisnya.
9. Teman-teman Teknik Elektro, yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan bantuan selama proses penyusunan tugas ahir ini.
10. Desti Imera Tarigan, Terimakasih atas motivasi dan dukungan selama penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang, khususnya dalam bidang teknik elektro, dan menjadi kontribusi kecil bagi perkembangan dunia teknik.

Medan,.....

Ilham Wahyudi

DAFTAR ISI

ABSTRAK i
ABSTRACK iv
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL……..……viii
BAB I 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan masalah 6
1.3 Ruang Lingkup 6
1.4 Tujuan Penelitian 6
1.5 Manfaat Penelitian 7
BAB II 8
2.1 Tinjauan Pustaka 8
2.2 Landasan Teori 11
2.2.1 Motor Induksi Tiga Fasa 11
2.2.2 *Variable Frequency Drive* (VFD) 16
2.2.3 Sistem Refrigrasi Pendingin 27
2.2.4 Suhu Ruangan 31
2.2.5 Debit Refrigerant 33
2.2.6 Aliran Massa Refrigerant 34
2.2.7 Set Point 36
BAB III 38
3.1 Desain Penelitian 38
3.2 Lokasi dan Waktu penelitian 38
3.3 Objek Penelitian 39
3.4 Variable Penelitian 39
3.5 Alat dan Bahan Penelitian 40
3.5.1 Alat Penelitian 40
3.5.2 Bahan Penelitian 46
3.6 Prosedur Penelitian 49
3.7 *Flow Chart* Penelitian 49
3.8 Tahapan Pelaksanaan Penelitian 51
3.9 Metode Analisa Data 53

3.10 Analisis Hubungan Variabel 55
BAB IV 56
4.1 Pengujian Sistem Dengan Inverter *Variable Frequency Drive* (VFD) 56
4.2 Hasil Pengujian Motor Kompresor 3 Fasa 56
4.3 Analisa Data 57
4.3.1 Analisa Kecepatan Sinkron Motor 57
4.3.2 Laju Penurunan Suhu Ruangan 59
4.3.3 Analisis Efektifitas Pendingin 61
4.3.4 Analisis Daya Motor 63
4.3.5 Analisis Penggunaan Energi 66
4.3.6 Analisis Faktor Daya 68
BAB V 71
5.1 Kesimpulan 71
5.2 Saran 72
DAFTAR PUSTAKA 74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem HVAC *Cold Storage* 10
Gambar 2. 2 Stator 11
Gambar 2. 3 Rotor 12
Gambar 2. 4 *Rectifier* (Penyearah AC ke DC) 18
Gambar 2. 5 Rangkaian DC Link / DC Bus 19
Gambar 2. 6 Rangkain Inverter DC to AC 20
Gambar 2. 7 DTC *(Direct Torque Control)* 23
Gambar 2. 8 FOC *(Field Oriented Control)* 23
Gambar 2. 9 DTC *(Direct Torque Control)* 24
Gambar 2. 10 Unit Inverter VFD 27
Gambar 2. 11 Sistem Refrigerasi 30
Gambar 3. 1 KWH Meter 40
Gambar 3. 2 Amper Meter 42
Gambar 3. 3 Infrared Thermometer 43
Gambar 3. 4 *Human Machine Interface* 44
Gambar 3. 5 Power Factor Control 45
Gambar 3. 6 Motor Induksi Tiga Fasa 46
Gambar 3. 7 Inverter VFD 47
Gambar 3. 8 Sistem Refrigerant 48

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian 56
Tabel 4. 2 Perbandingan Kecepatan Teoritis dan Aktual..... 57
Tabel 4. 3 Laju Penurunan Suhu 59
Tabel 4. 4 Indeks Efektivitas..... 61
Tabel 4. 5 Perhitungan Daya Motor..... 63
Tabel 4. 6 Penggunaan Energi 66
Tabel 4.7 Faktor Daya..... 68

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik di sektor industri terus meningkat seiring dengan berkembangnya teknologi dan meningkatnya kapasitas produksi. Salah satu sektor industri yang memiliki konsumsi energi cukup besar Adalah industri pendingin, khususnya pada sistem refrigrasi yang digunakan dalam cold storage, pabrik es, industri makanan dan minuman, hingga sistem HVAC *(Heating, Ventilation, and Air Conditioning).* Dari keseluruhan komponen pada sistem pendingin, kompresor refrigerant merupakan salah satu peralatan yang paling banyak menyerap energi listrik karena ber-operasi secara terus menerus untuk menjaga kesetabilan suhu sesuai dengan kebutuhan proses produksi maupun penyimpanan.

Secara umum, kompesor refrigerant di gerakkan oleh motor induksi tiga fasa yang ber-oprasi pada kecepatan konstan. Hal ini menyebabkan konsumsi energi listrik cenderung tinggi meskipun beban pendingin tidak selalu berada pada kondisi maksimum. Dalam praktiknya, kebutuhan pendinginan pada industri bersifat fluktuatif, tergantung pada jumlah yang disimpan, frekuensi buka tutup ruang pendingin, seringkali menyebabkan enfisiensi energi, pemborosan biaya oprasional, serta menurunnya umur pakai komponen akibat beban kerja yang tidak proposional.

Salah satu teknologi yang banyak di gunakan untuk menjawab tantangan tersebut Adalah inverter VFD, bekerja dengan cara mengatur frekuensi dan tegangan suplai listrik ke motor, sehingga motor dapat beroprasi dengan kecepatan variable sesuai kebutuhan pendinginan. Dengan adanya pengaturan ini, konsumsi listrik dapat di tekan, karena motor hanya berkerja sesuai beban yang diperlukan. Selain itu, penggunaan invereter dapat mengurangi siklus start-stop motor kompresor, yang basanya menjadi penyebab utama meningkat nya arus dan mempercepat kerusakan komponen.

Penerapan inverter pada motor kompresor refrigerant terbukti mampu memberikan efesiensi energi yang signifikan. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan VFD dapat menghemat energi listrik antara 15% hingga 40%, tergantung pada kapasitas sistem dan pola beban pendinginan. Selain penghematan

energi, invereter juga berperan dalam meningkatkan *Coefficient of Performance* (COP) system refrigrasi, sehingga sistem pendingin menjadi lebih efesien secara keseluruhan. Hal itu tentu memberikan keuntungan besar bagi industri, baik dari segi penghematan biaya oprasional maupun peningkatan ke andalam system pendingin.

Namun demikian. Penerapan inverter juga menimbulkan beberapa permasalah teknis, terutama terkait dengan kualitas daya listrik. Inveter menghasilkan gelombang tegangan dan arus non-sinusoidal yang mengandung harmonisa. Tingginya nilai Total *Harmonic Distotion* (THD) dapat mempengaruhi kinerja peralatan lain dalam sistem kelistrikan industri, serta berpotensi menimbulkan kerugian energi tambahan. Oleh karena itu, analisi lebih lanjut menegenai pengaruh inverter terhadap kualitas daya sangat penting dilakukan agar pengunaannya benar-benar memberikan keuntungan optimal tanpa menimbulkan masalah baru.

Berdasarkain uraian tersebut, penelitian "efektifitas dan efesiensi energi untuk kinerja Motor Kompresor Refrigerant tiga fasa dengan Penerapan Inverter VFD di Industri Pendingin" menjadi sangat relevan. Penelitian ini tidak hanya mengkaji besarnya penghematan energi dan peningkatan efesiensi sistem pendingin akibat penggunaan inverter, tetapi juga mengevaluasi pengaruhnya terhadap kinerja kompresor dan kualitas daya listrik. Dengan demikian, hasil penelitian di harapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam upaya efesiensi di sektor industri, sekaligus menjadi referensi bagi penerapan teknologi inverter pada sistem pendingin bersekala besar. Perkembangan teknologi industri saat ini menuntut sistem produksi yang tidak hanya memiliki performa tinggi, tetapi juga efisien dalam penggunaan energi. Dalam konteks industri pendingin, efisiensi energi menjadi faktor krusial karena sistem refrigerasi beroperasi selama 24 jam tanpa henti. Hal ini menyebabkan konsumsi energi listrik menjadi sangat besar dan berdampak langsung terhadap biaya operasional perusahaan.

Selain itu, meningkatnya isu global terkait penghematan energi dan pengurangan emisi karbon juga mendorong industri untuk mulai menerapkan teknologi yang lebih ramah lingkungan. Penggunaan inverter VFD merupakan salah satu solusi modern yang mampu mengurangi konsumsi energi.

Namun, implementasi teknologi VFD di lapangan tidak selalu berjalan optimal tanpa adanya analisis yang tepat. Setiap perubahan frekuensi akan mempengaruhi performa motor, konsumsi daya, serta karakteristik pendinginan. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang lebih mendalam untuk mengetahui hubungan antara variasi frekuensi terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Selain itu, dalam sistem refrigerasi modern, penggunaan energi listrik tidak hanya dipengaruhi oleh kapasitas peralatan, tetapi juga oleh pola operasional dan pengendalian sistem. Sistem yang masih menggunakan metode konvensional cenderung bekerja pada kondisi tetap *(fixed speed)*, sehingga tidak mampu menyesuaikan kebutuhan pendinginan secara dinamis. Hal ini menyebabkan terjadinya pemborosan energi terutama saat beban pendinginan menurun, namun kompresor tetap beroperasi pada kapasitas maksimum. Penggunaan teknologi kontrol kecepatan seperti inverter atau VFD menjadi salah satu solusi yang semakin banyak diterapkan dalam industri. VFD memungkinkan pengaturan kecepatan motor listrik dengan cara mengubah frekuensi dan tegangan suplai, sehingga kinerja kompresor dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban pendinginan secara real-time. Dengan demikian, sistem tidak hanya menjadi lebih efisien, tetapi juga lebih fleksibel dalam menghadapi perubahan kondisi operasional.

Di sisi lain, penerapan VFD pada sistem refrigerasi juga memberikan dampak positif terhadap umur peralatan. Motor yang tidak selalu bekerja pada kecepatan maksimum akan mengalami penurunan tingkat keausan, getaran, dan suhu operasi. Hal ini secara tidak langsung dapat mengurangi biaya perawatan serta meningkatkan keandalan sistem dalam jangka panjang. Namun demikian, implementasi VFD juga memerlukan analisis yang tepat, karena pengaturan frekuensi yang tidak sesuai dapat menyebabkan penurunan performa sistem pendinginan.

Lebih lanjut, dalam industri pendingin seperti *cold storage*, pabrik es, dan industri makanan, kestabilan suhu merupakan faktor yang sangat penting. Fluktuasi suhu yang tidak terkontrol dapat berdampak pada kualitas produk, bahkan menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, sistem kontrol yang adaptif seperti VFD menjadi sangat penting untuk menjaga kestabilan suhu sekaligus mengoptimalkan konsumsi energi listrik.

Namun pada praktiknya, masih banyak industri yang belum mengoptimalkan penggunaan inverter secara maksimal. Hal ini disebabkan oleh kurangnya pemahaman mengenai karakteristik kerja VFD, serta belum adanya analisis mendalam terkait hubungan antara variasi frekuensi dengan parameter kinerja seperti arus, daya, suhu, dan efisiensi sistem. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang dapat memberikan gambaran secara komprehensif mengenai pengaruh variasi frekuensi terhadap kinerja motor kompresor refrigerant. Selain itu, peningkatan efisiensi energi juga sejalan dengan upaya pemerintah dan industri dalam mendukung program konservasi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Sistem refrigerasi yang lebih efisien tidak hanya mengurangi biaya operasional, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini memiliki nilai strategis baik dari sisi teknis maupun lingkungan.

Berdasarkan uraian tersebut, maka penelitian mengenai efektivitas dan efisiensi energi pada motor kompresor refrigerant tiga fasa dengan penerapan VFD menjadi sangat penting untuk dilakukan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih mendalam terkait pengaruh variasi frekuensi terhadap performa sistem, serta menjadi acuan dalam penerapan teknologi inverter pada sistem pendingin di industri. Dalam implementasinya, hubungan antara frekuensi yang diatur oleh VFD dengan parameter kelistrikan seperti arus dan daya menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan. Perubahan frekuensi akan secara langsung mempengaruhi kecepatan putaran motor induksi, yang kemudian berdampak pada kapasitas kerja kompresor dalam sistem refrigerasi. Semakin tinggi frekuensi yang diberikan, maka kecepatan motor akan meningkat, sehingga kapasitas pendinginan juga meningkat. Sebaliknya, penurunan frekuensi akan mengurangi kapasitas pendinginan yang dihasilkan.

Namun demikian, peningkatan frekuensi juga akan diikuti oleh peningkatan konsumsi daya listrik. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan yang optimal agar sistem dapat bekerja pada titik efisiensi terbaik *(optimal operating point)*. Tanpa pengaturan yang tepat, penggunaan VFD justru berpotensi tidak memberikan keuntungan yang signifikan terhadap penghematan energi, bahkan dapat menyebabkan ketidak seimbangan sistem. Selain itu, karakteristik beban pada sistem refrigerasi yang bersifat dinamis menuntut adanya sistem kontrol yang

responsif dan adaptif. Faktor-faktor seperti jumlah produk yang disimpan, frekuensi pembukaan pintu ruang pendingin, kondisi lingkungan sekitar, serta beban panas internal akan mempengaruhi kebutuhan pendinginan secara keseluruhan. Oleh karena itu, penggunaan VFD harus disertai dengan strategi pengendalian yang tepat agar mampu merespons perubahan beban secara efektif. Dari sisi teknis, penerapan VFD juga dapat mempengaruhi kualitas daya listrik, seperti munculnya harmonisa yang dapat mengganggu kinerja peralatan listrik lainnya. Oleh karena itu, analisis terhadap kualitas daya menjadi bagian penting dalam evaluasi penggunaan inverter pada sistem industri. Dengan memahami karakteristik tersebut, diharapkan sistem dapat dirancang dengan mempertimbangkan aspek efisiensi sekaligus keandalan.

Selain faktor teknis, aspek ekonomi juga menjadi pertimbangan utama dalam penerapan teknologi VFD. Investasi awal untuk pemasangan inverter relatif lebih tinggi dibandingkan dengan sistem konvensional. Namun, jika dilihat dari sisi jangka panjang, penghematan energi yang dihasilkan serta penurunan biaya perawatan dapat memberikan keuntungan yang signifikan. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang komprehensif untuk mengetahui seberapa besar pengaruh penggunaan VFD terhadap efisiensi biaya operasional.

Lebih lanjut, perkembangan teknologi digital dan sistem otomasi industri juga turut mendukung optimalisasi penggunaan VFD. Integrasi antara inverter dengan sistem kontrol berbasis sensor dan *programmable logic controller* (PLC) memungkinkan pengoperasian sistem yang lebih cerdas dan efisien. Sistem dapat secara otomatis menyesuaikan kecepatan motor berdasarkan kondisi aktual di lapangan, sehingga penggunaan energi dapat ditekan seminimal mungkin tanpa mengorbankan performa. Dengan mempertimbangkan berbagai aspek tersebut, penelitian ini tidak hanya berfokus pada pengukuran efisiensi energi, tetapi juga pada analisis hubungan antara variasi frekuensi terhadap parameter kinerja sistem secara menyeluruh. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem refrigerasi yang lebih efisien, handal, dan ramah lingkungan, serta menjadi referensi bagi industri dalam mengimplementasikan teknologi Variable Frequency Drive secara optimal.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan yang dapat dirumuskan adalah:

1. Bagaimana pengaruh penerapan inverter Variable Frequency Drive terhadap efektifitas kinerja motor tiga fasa sebagai penggerak kompresor refrigerant pada sistem pendingin industri?
2. Bagaimana hubungan antara Variasi Frequency Drive dengan performa motor dan stabilitas system pendingin?

1.3 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dalam peneliatan ini sebagai berikut:

1. Objek penelitan ini Adalah motor induksi tiga fasa sebagai penggerak kompresor refrigerant pada sistem pendingin industry.
2. Penelitian difokuskan pada penerapan dan pengaruh inverter VFD terhadap kinerja motor dan efesiensi energi sistem pendingin.
3. Analisis difokuskan pada aspek teknis dan energi, dengan indikator utama berupa efesiensi listrik, performa motor, dan stabilitas sistem pendingin.
4. Data yang digunakan diperoleh dari hasil pengujian industri pendingin yang memakai penerapan inverter VFD serta didukung oleh studi literatur terkait sistem pendingin dan pengendali kecepatan motor.
5. Paramater yang diteliti meliputi daya listrik, arus, faktor daya, efesiensi motor, kecepatan putaran motor.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian ini Adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penerapan Inverter VFD terhadap kinerja motor induksi tiga fasa kompresor refrigerant di industri pendingin.
2. Mengukur dan menganalisis konsumsi energi listrik pada sistem pendingin dengan penggunaan inverter VFD pada motor tiga fasa sebagai penggerak kompresor refrigerant.
3. Mengetahui efektifitas yang dihasilkan melalui pengaturan frekuensi dan kecepatan motor menggunakan penerapan inverter VFD di sistem industri pendingin.
4. Memberikan rekomendasi teknisi penerapan Inverter VFD untuk

meningkatkan efesiensi energi pada sistem pendingin industri.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun Manfaat dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar bagi industri pendingin dalam memahami potensi penghematan energi melalui penggunaan VFD. Dengan pengaturan kecepatan motor sesuai kebutuhan beban, konsumsi energi listrik dapat ditekan sehingga biaya operasional perusahaan menjadi lebih rendah.
2. Penerapan VFD memungkinkan kompresor bekerja secara lebih fleksibel mengikuti perubahan beban pendinginan. Hal ini meningkatkan kestabilan suhu sistem refrigerasi, sehingga kualitas proses produksi atau penyimpanan produk yang membutuhkan pendinginan dapat terjaga dengan baik.
3. Penelitian ini dapat menjadi referensi tambahan bagi mahasiswa dan peneliti lain yang mengkaji topik motor induksi tiga fasa, sistem refrigerasi, maupun teknologi penggerak listrik berbasis inverter.
4. Penelitian ini meningkatkan pemahaman peneliti mengenai karakteristik kerja motor induksi tiga fasa, sistem refrigerasi, serta prinsip kerja dan aplikasi VFD di industri nyata.
5. Peneliti memperoleh pengalaman dalam melakukan pengukuran parameter listrik, analisis data energi, serta evaluasi kinerja sistem industri secara komprehensif.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian terkait penerapan inverter Variable Frekuensi Drive pada motor induksi tiga fasa telah berkembang pesat seiring meningkatkanya kebutuhan efesiensi energi di berbagai sektor industri. Berbagai penelitian awal menunjukanbahwa penggunaan Variable Frequency Drive menjadi salah satu metode paling efektif untuk menurunkan konsumsi daya listrik, terutama pada peralatan yang beroprasi dengan karakteristik beban berubah-ubah seperti pompa, blower, dan kompresor. Sutanto (2018) dalam penelitiannya pada sistem industri menyatakan bahwa pengendalian kecepatan motor melalui VFD mampu mengurangi konsumsi energi hingga 40% pada beban persial. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa pengaturan frekuensi yang dilakukan oleh VFD memungkinkan motor harus beroprasi pada kecepatan maksimal seperti pada sistem konvensional.

Temuan serupa juga diperkuat oleh Gunawan dan Prakoso (2020) yang membandingkan kinerja motor induksi tiga fasa sebelum dan sesudah pemasangan VFD. Mereka menemukan bahwa motor yang dikendalikan oleh VFD menunjukan efesiensi yang lebih tinggi karena mampu menjaga nilai torsi konstan pada kecepatan rendah dan mengurangi arus start hingga 60-70%. Selain itu, penelitian ini juga mengungkapkan bahwa penggunaan VFD mengurangi fluktasi tegangan dan arus, sehinggga memperpanjang umjr isolasi motor dan menurunkan resiko kerusakan pada peralatan listrik. Hal ini memberi gambaran bahwa selain memberikan manfaat penghematan energi, VFD juga meningkatkan keandalan sistem motor secara keseluruhan.

Dalam konteks sistem refrigerasi, berbagai penelitian telah menunjukan bahwa kompresor adalah komponen dengan konsumsi energi terbesar dalam sistem pendingin, yaitu mencapai 60-75% dari total energi. Oleh karena itu, upaya untuk meningkatkan efesiensi kompresor akan sangat mempengaruhi efesiensi keseluruhan sistem pendingin. Saputra (2019) menjelaskan bahwa efesiensi kompresor berbanding lurus dengan performa refrigerasi yang diukur melalui Coefficient Of Performance (COP). Dengan melakukan pengaturan kecepatan

melalui VFD, laju aliran refrigerant depat disesuiakan dengan kondisi beban pendingin. Penelitian tersebut menunjukan bahwa pengurangan frekuensi dari 50 Hz menjadi 40 Hz dapat menghemat energi sebesar 18% tanpa mempengaruhi kapasitas pendingin secara signifikan.

Penelitian oleh Maradona dan Dwi (2020) turut menegaskan bahwa pengaplikasian inverter VFD pada kompresor industri dapat memberikan penghematan energi yang signifikan. Mereka melakukan pengujian pada sistem pendingin cold storage dan menemukan bahwa kompresor yang dikendalikan oleh VFD mampu mengurangi konsumsi listrik sebesar 20-35% dibandingkan dengan sistem *on-off* konvensional. Penggunaan Variable Frequency Drive juga mencegah terjadinya siklus start-stop yang berulang, yang dikaenal sebagai penyebab utama kenaikkan arus puncak dan penurunan efesiensi motor. Selain menghemat energi, penelitian ini mencatat bahwa suhu kompresor cenderung lebih stabil karena motor bekerja lebih halus dan tidak mengalami hentakan mekanis.

Studi lain oleh Yunarko (2020) pada sistem *Variable Refrigerant Flow* (VRF) juga memnunjukan peningkatan cop sebesar 15-30% dengan penggunaaan kontrol inverter pada kompresor. Sistem VRF menggunakan prinsip serupa Variable Frequency Drive untuk mengatur kapasitas pendinginan berdasarkan beban aktual. Penelitian ini memperkuat temuan bahwa kontrol kecepatan motor melalui inverter dapat meningkatkan efesiensi energi secara signifikan pada aplikasi kompresor.

Sementara itu penelitian, tentang karakteristikn motor industri tiga fasa juga memberikan dasar teoristis yang kuat. Andika (2017) menemukan bahwa motor induksi berkerja paling efesiensi pada beban mendekati 80% dari kapasitas nominal. Ketika motor berkerja pada beban penuh, rugi-rugi baik dari sisi rugi tembaga (I($I^2\,R$) maupun rugi inti meningkat secara signifikan. Mahfud (2021) menjelaskan bahwa pada metode V/F control, VFD menjaga perbandingan tegangan dan frekuensi tetap proposional sehingga fluks magnetik motor tetap stabil. Hal ini memungkinkan motor mempertahankan torsi optimal meskipun berkerja pada frekuensi rendah,sehingga efesiensi motor dapat tetap tinggi dan rugi-rugi diminimalkan.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas penggunaan VFD pada motor induksi dan kompresor refrigerant, sebagian besar studi lebih banyak menggunakan

metode simulasi atau pengujian laboraturium. Hanya sedikit npenelitian yang dilakukan langsung pada lingkungan industri pendingin skala menengah yang menghadapi variasi beban nyata, fluktasi suhu, dan kondisi oprasional yang dinamis.selain itu penelitian sebelumnya masih jarang mengabungkan analisis daya, performa termal kompresor, arus kerja, Frekuensi oprasi, serta efesiensi energi dalam satu kajian terpadu . karena itu, peneltian ini memiliki urgensi untuk memberikan gambaran empiris yang lebih komprehensif mengenai efektifitas dan efesiensi energi yang diproleh melalui penerapan VFD pada motor tiga fasa kompresor refrigerant di lingkungan industri pendingin yang sebenarnya.



Gambar 2. 1 Sistem HVAC Cold Storage

(PT.Winson Cold Storage)

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

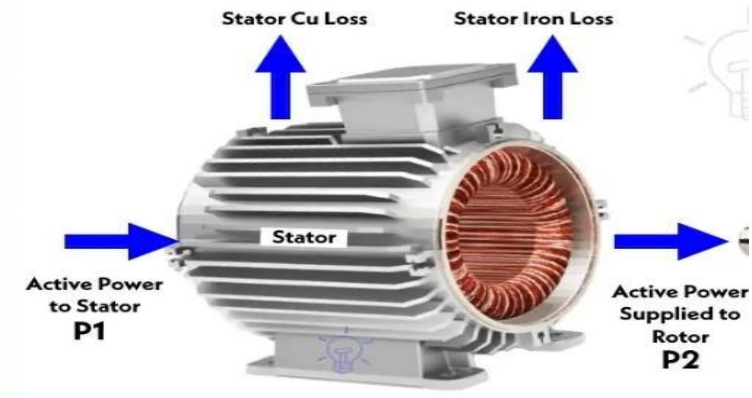
Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik arus bolak-balik (AC) yang banyak digunakan dalam industri karena memiliki konstruksi sederhana, handal, efesiensi tinggi, serta biaya perawatan rendah. Motor induksi berkerja bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana arus pada rotor dihasilkan oleh medan magnet putar (*Rotaring Magnetic Field*) yang berasal dari stator tanpa adanya hubungan listrik langsung.

Ketika tegangan AC tiga fasa diberikan pada lilitan stator, akan terbentuk medan magnet yang berputar dengan kecepatan sinkron. Medan magnet ini menginduksi arus pada rotor, sehingga timbul gaya Lorentz yang menyebabkan rotor ikut berputar.

A. Analisis Konstruksi: Stator dan Rotor

Secara mekanis, motor induksi terdiri dari dua bagian utama yang dipisahkan oleh celah udara (air gap):

1. Stator (Bagian Diam):

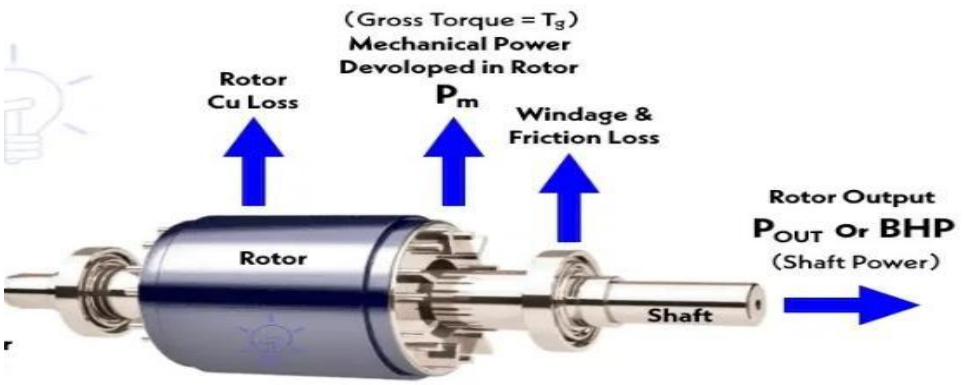


Gambar 2. 2 Stator

Stator merupakan komponen stasioner pada motor induksi tiga fasa yang berperan krusial sebagai terjadinya konversi energi listrik menjadi medan magnet putar . struktur utama stator terdiri dari rangka, inti stator, dan belitan stator. Inti stator tidak dibuat dari blok besi pejal, melainkan tersusun dari tumpukan laminasi baja silikon (*silicon steel*) berkualitas tinggi. Penggunaan laminasi ini bertujuan untuk meminimalisir rugi arus pusar

(*eddy current losses*) yang dapat menimbulkan panas berlebih dan menurunkan efisiensi motor. Setiap lembaran laminasi dilapisi dengan bahan isolasi tipis untuk memutus jalur arus pusar tersebut. Selain itu, penambahan silikon pada material baja berfungsi untuk meningkatkan resistivitas listrik dan menurunkan rugi histeresis. Di dalam alur-alur (*slots*) inti stator, ditempatkan tiga set belitan tembaga yang terpisah secara fisik dengan sudut 180°C dibagi tiga, yaitu tepat 120°. Ketika terminal stator dihubungkan ke sumber tegangan bolak-balik (AC) tiga fasa, arus akan mengalir pada masing-masing belitan dengan perbedaan fasa waktu sebesar 120° listrik. Kombinasi antara letak fisik belitan dan perbedaan fasa arus inilah yang menghasilkan *Rotating Magnetic Field* (RMF) atau medan magnet putar.

2. Rotor (Bagian Berputar):



Gambar 2. 3 Rotor

- Tipe Sangakar Tupai (*Squirrel Cage*): Pada rotor tipe sangkar tupai (*squirrel cage*), arus induksi yang mengalir pada batang konduktor akan menghasilkan medan magnet yang berinteraksi dengan medan magnet stator. Interaksi ini menimbulkan gaya elektromagnetik yang menghasilkan torsi putar. Keunggulan utama rotor tipe ini adalah konstruksinya yang sederhana, tidak menggunakan sikat *(brush),* serta memiliki tingkat keandalan yang tinggi. Hal ini menyebabkan rotor sangkar tupai sangat cocok digunakan pada sistem yang membutuhkan operasi kontinu dengan perawatan minimal.

- Tipe Belitan *(Wound Rotor)*: Memiliki lilitan tiga fasa yang dihubungkan ke slip ring. Ini memungkinkan penambahan hambatan eksternal untuk mengatur torsi asut *(Starting Torque)*. Sementara itu, rotor belitan *(wound rotor)* memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas pengaturan torsi awal. Dengan adanya slip ring dan kemungkinan penambahan tahanan eksternal, motor dengan rotor belitan dapat menghasilkan torsi awal yang lebih besar dibandingkan rotor sangkar tupai. Hal ini sangat bermanfaat pada aplikasi yang membutuhkan beban awal tinggi, seperti conveyor, crane, dan mesin-mesin industri berat lainnya. Namun demikian, rotor tipe ini memiliki kekurangan berupa kebutuhan perawatan yang lebih intensif akibat adanya komponen mekanis seperti sikat dan slip ring.

B. Prinsip Transformasi Energi (Hukum Faraday & Lorentz)

Proses perubahan energi listrik menjadi energi mekanik pada motor induksi mengikuti urutan berikut:

1. Induksi Elektromagnetik: Medan putar dari stator memotong batang-batang koduktor pada rotor. Berdasrkan hukum faraday, perbedaan kecepatan antara medan putar pada rotor menyebabkan timbul GGL (Gaya Gerak Listrik) pada rotor.
2. Arus Rotor: Karena rotor dalam keadaan terhubung singkat, GGL tersebut menghasilkan arus listrik pada rotor.
3. Gaya Lorentz: Arus listrik didalam penghantar rotor berada dibawah pengaruh medan magnet stator akan menghasilkan gaya mekanis (Gaya Lorentz). Gaya inilah yang menciptakan torsi untuk memutar rotor mengikuti arah medan putar stator.

C. Prinsip Kerja dan Medan Magnet Putar

Ketika tegangan AC tiga fasa diberikan pada lilitan stator, akan terbentuk medan magnet yang berputar kecepatan sinkron, medan magnet ini menginduksi arus pada rotor, sehingga timbul gaya Lorentz yang menyebabkan rotor ikut berputar searah dengan medan putar stator. Kecepatan putar medan magnet stator (kecepatan sinkron) dinyatakan dengan rumus:

$$n_s = \frac{120f}{p}$$

Di mana:

- n_s = Kecepatan Sikron (RPM)
- f = Frekuensi (HZ)
- p =Jumlah Kutub Motor

D. Konsep Slip

Motor induksi selalu erkerja pada ”Slip” yaitu adanya perbedaan antara kecepatan sinkron (n_s) dan kecepatan rotor nyatanya (n_r). Slip dibutuhkan agar terjadi pemotong garis gaya magnet yang menginduksi arus pada rotor. Besarnya nilai slip umumnya dinyatakan dalam bentuk persentase relatif terhadap kecepatan sinkronnya, yang secara matematis dirumuskan sebgai berikut:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \text{ x } 100\%$$

Di mana:

- s = Slip
- n_s = Kecepatan Sinkron (RPM)
- n_r = Kecepatan Rotor (RPM)

E. Rugi-Rugi dan Efesiensi

Efesiensi motor adalah perbandingan antara daya output mekanik dengan daya input listrik, adanya rugi-rugi tersebut menyebabkan daya output mekanik selalu bernilai lebih kecil dari pada daya input listrik. Secara matematis hubungan antara daya input, rugi-rugi total, dan efesiensi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Daya hilang *(losses)* dalam proses konversi energi meliputi:

- *Copper loss* (I^2R): Panas yang timbul pada lilitan tembaga.
- *Iron loss*: Rugi pada inti besi akibat medan magnet
- *Friction and windage loss*: Gesekan pada bantalan *(bearing)* dan hambatan udara.

F. Karakteristik Motor Induksi

Beberapa karakteristik oprasional yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Torsi-Kecepatan: Kecepatan putaran akan sedikit menurun Ketika beban mekanik pada poros meningkat.
2. Arus Asut *(Starting Current)*: Motor induksi memiliki arus awal yang sangat besar, mencapai 5-8 kali arus nominal saat dihidupkan secara langsung (Direct Online).
3. Efesiensi Tinggi: Umumnya berkisar antara 75-97% tergantung pada kapasitas dan beban motor.
4. Keunggulan Self-Starting: Motor tiga fasa dapat mulai berputar tanpa memerlukan bantuan kapasitor atau peralatan asut tambahan.

G. Aplikasi Motor induksi pada sistem Refrigerasi dan Penggunaan VFD

Motor tiga fasa digunakan secara luas pada sistem kompresor refrigerasi karena mampu menghasilhan torsi besar, bekerja stabil pada beban kontinyu, dan memiliki ketahanan yang baik terhadap kondisi suhu dan tekanan. Namun, dalam sistem kovensional, motor sering kali bekerja dengan metode *on-off* atau berjalan pada kecepatan penuh secara konstan, yang mengakibatkan pemborosan energi yang signifikan saat beban pendingin rendah.

Untuk meningkatkan kinerja motor induksi tiga fasa dalam aplikasi sistem refrigerasi, motor ini sering dikombinasikan dengan VFD. Berdasarkan rumus kecepatan sinkron, dengan mengubah frekuensi melalui VFD, maka kecepatan motor dapat di atur secara presisi sesuai dengan kebutuhan beban pendingin. Hal ini sangat efektif untuk mengurangi listrik dibandingkan menjalankan motor pada kecepatan penuh secara terus menerus, Dengan memanipulasi nilai frekuensi melalui VFD, maka kecepatan motor dapat diatur secara presisi sesuai dengan kebutuhan beban pendingin (cooling load) pada waktu tertentu.

2.2.2 Variable Frequency Drive (VFD)

Inverter Variable Frekuensi Drive (VFD) adalah sebuah perangkat elektronika daya yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor listrik Alternating Current (AC), khususnya motor induksi tiga fasa, dengan cara mengubah frekuensi dan tegangan listrik yang di berikan ke motor tersebut. Kemampuan inverter untuk mengubah-ubah frekuensi sangat krusial karena:

- Kendali Kecepatan: Kecepatan putar motor AC berbanding lurus dengan frekuensi. Dengan mengubah frekuensi, kita dapat mengatur kecepatan motor secara presisi tanpa kehilangan torsi yang signifikan.
- Efisiensi Energi: Memungkinkan sistem pompa atau kipas bekerja sesuai kebutuhan beban, bukan selalu dalam kecepatan penuh, sehingga menghemat konsumsi listrik secara drastis.

VFD juga di kenal dengan istilah AC Drive, Variable Speed Drive (VSD), atau Adjustable Frequency Drive (AFD). Variable Frequency Drive (VFD) bekerja memalui tiga tahap utama yaitu:

a . Rectifier (Penyearah AC ke DC)

Rangkaian penyearah atau *rectifier* merupakan blok fundamental dalam sistem elektronika daya yang berfungsi untuk mengonversi energi listrik dari arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Secara teknis, proses penyearahan ini sangat krusial karena mayoritas beban industri dan perangkat elektronik membutuhkan tegangan DC yang stabil untuk beroperasi, sementara sistem distribusi tenaga listrik dari penyedia (grid) menggunakan sistem AC.

Prinsip kerja Penyearah Gelombang Penuh (Bridge Rectifier) Berdasarkan rangkaian yang digunakan adalah penyearah gelombang penuh tipe jembatan (*Full-Wave Bridge Rectifier*) yang menggunakan empat buah dioda. Keunggulan utama dari topologi ini dibandingkan dengan penyearah setengah gelombang adalah kemampuannya untuk memanfaatkan kedua siklus (positif dan negatif) dari gelombang AC input.

- Siklus Positif: Ketika tegangan AC berada pada fase positif, sepasang dioda (misalnya D1 dan D2) akan berada dalam kondisi *forward bias* (menghantar), sehingga arus mengalir ke beban.

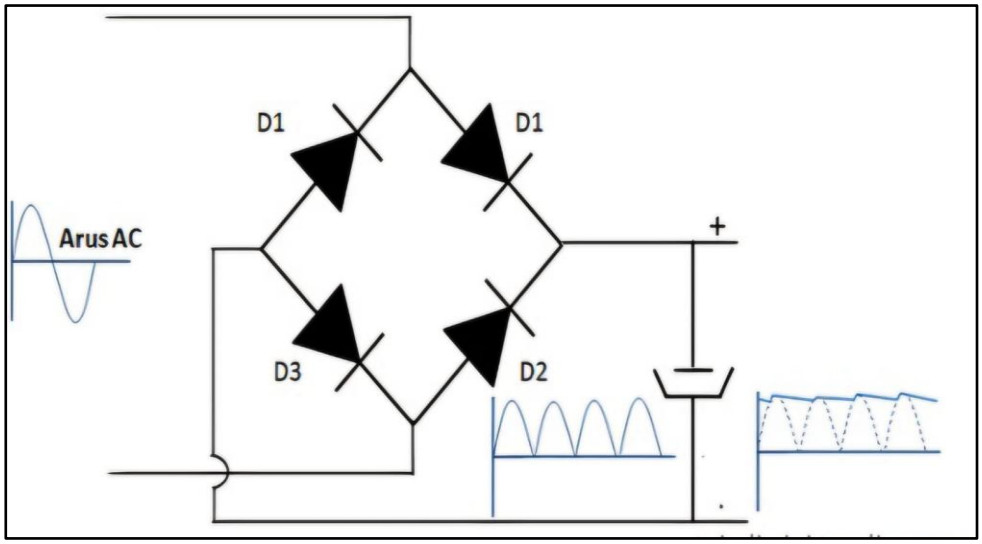
- Siklus Negatif: Sebaliknya, saat tegangan AC berbalik ke fase negatif, pasangan dioda lainnya (D3 dan sepasang pasangannya) akan menghantar. Hal ini memastikan bahwa arah arus yang mengalir pada sisi beban tetap satu arah (searah).

Penggunaan Komponen Semi Konduktor dalam aplikasi di industri, pemilihan komponen penyearah sangat bergantung pada besaran daya yang dikelola:

- Dioda: Digunakan untuk penyearah tak terkendali (*uncontrolled rectifier*) di mana output tegangan DC bersifat konstan sesuai dengan input AC.
- Thyristor (SCR): Digunakan untuk penyearah terkendali (*controlled rectifier*). Dengan mengatur sudut penyulutan (*firing angle*) pada gerbang-thyristor, tegangan output DC dapat diatur nilainya sesuai kebutuhan sistem, seperti pada pengaturan kecepatan motor DC atau pengisian baterai skala besar.

Pentingnya filter Kapasitor Output murni dari rangkaian dioda bridge sebenarnya masih memiliki riak tegangan (ripple) yang cukup tinggi, yang dikenal sebagai DC denyut (pulsating DC). Untuk meminimalisir riak tersebut, dipasang komponen filter berupa kapasitor. Kapasitor berfungsi sebagai penyimpan energi sementara; ia akan terisi (*charging*) saat tegangan naik menuju puncak dan akan membuang muatan (*discharging*) ke beban saat tegangan input turun. Proses ini menghasilkan bentuk gelombang output yang lebih rata (*smooth*), mendekati garis lurus DC murni, yang sangat penting untuk menjaga integritas komponen elektronik sensitif dari gangguan harmonisa atau fluktuasi tegangan.

Aplikasi pada sistem industri pada sistem tenaga listrik tiga fasa (seperti tegangan 380/400 V yang umum di industri), prinsip ini dikembangkan menggunakan enam buah dioda atau thyristor. Penyearah ini sering ditemukan pada blok pertama perangkat *Variable Speed Drive* (VSD) atau *Inverter*, di mana tegangan AC dari jala-jala PLN disearahkan terlebih dahulu menjadi *DC Bus* sebelum dikonversi kembali menjadi AC dengan frekuensi yang dapat diatur.



Gambar 2. 4 Rectifier (Penyearah AC ke DC)

b. DC Link / DC Bus

Rangkaian DC Link bukan sekadar penghubung antara blok penyearah (*rectifier*) dan blok pembalik (*inverter*), melainkan berfungsi sebagai penyangga energi (*energy buffer*). Tegangan DC hasil penyearahan dari *bridge diode* masih memiliki riak tegangan (*voltage ripple*) yang cukup tinggi. Penempatan kapasitor dalam konfigurasi paralel pada jalur DC Bus berfungsi untuk menyerap riak tersebut sehingga menghasilkan tegangan DC yang lebih konstan dan bersih (stabil).

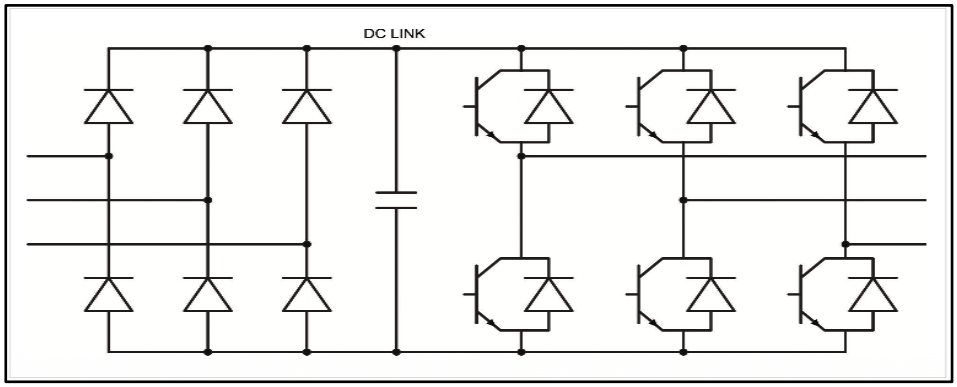
Selain menstabilkan tegangan, DC Link berperan penting dalam menangani lonjakan arus balik (*regenerative braking*) dari motor. Saat motor mengalami dekselerasi yang cepat, motor dapat berubah menjadi generator dan mengirimkan energi kembali ke sistem. Kapasitor pada DC Link akan menyerap kenaikan tegangan sesaat ini untuk melindungi komponen semikonduktor (seperti IGBT) dari kerusakan akibat *overvoltage*.

Dalam implementasi industri yang lebih kompleks, DC Link seringkali dilengkapi dengan beberapa komponen tambahan untuk meningkatkan performa sistem, laluntegangan DC yang telah di searahkan kemudian disimpan dan diratakan oleh rangkaian kapasitor (filter). Bagian ini berfungsi sebagai penstabil dan tempat penyimpanan energi sementara bsebelum dikonversi kembali ke AC.

$$V_{dc} = 1.35 \times V_{L\text{-}L\ (rms)}$$

Dimana:

- V_{dc} Adalah tegangan Dc Link (Volt)
- $V_{L\text{-}L\ (rms)}$ Adalah tegangan line to line input AC (misalnya 380 V).



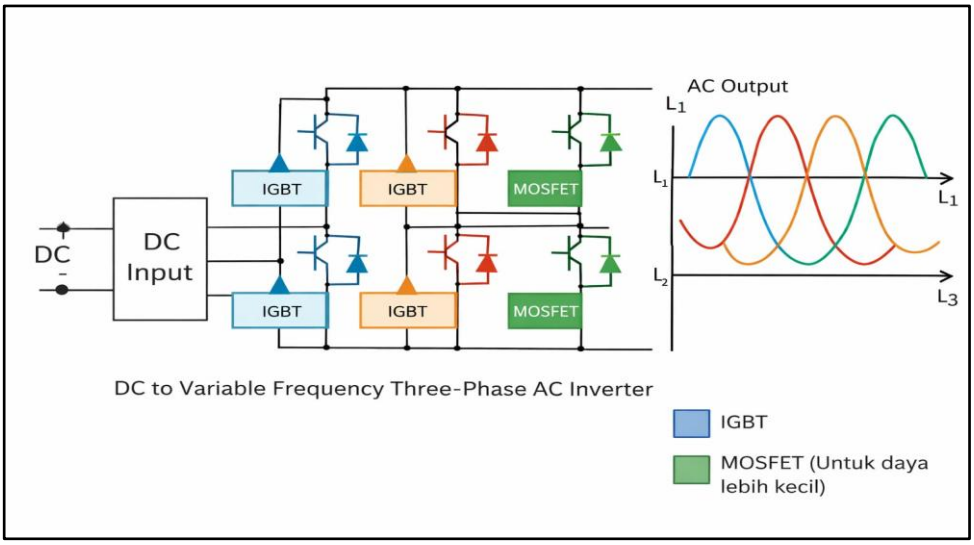
Gambar 2. 5 Rangkaian DC Link / DC Bus

C. Inverter (Pengubah DC ke AC Berfrekuensi Variable)

Inverter tiga fasa, sebuah perangkat elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan arus searah (DC) menjadi tegangan arus bolak-balik (AC) dengan karakteristik frekuensi dan tegangan yang dapat diatur (variable). Perangkat ini merupakan komponen kunci dalam sistem penggerak motor listrik modern (VFD - *Variable Frequency Drive*). Proses konversi ini terjadi melalui mekanisme pensaklaran (*switching*) yang cepat. Input berupa tegangan DC konstan dialirkan melalui enam buah sakelar elektronik yang disusun dalam tiga "lengan" (leg). Setiap lengan melayani satu fasa output (L1, L2, L3). Dengan mengatur durasi dan urutan buka-tutup sakelar tersebut (biasanya menggunakan metode *Pulse Width Modulation* atau PWM), inverter dapat membentuk gelombang sinusoidal yang saling bergeser sudut fasenya sebesar 120 derajat satu sama lain. Terdapat dua jenis perangkat semikonduktor utama yang digunakan:

- IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor): Digunakan untuk aplikasi daya menengah hingga tinggi. IGBT menggabungkan keunggulan impedansi input yang tinggi dari MOSFET dan tegangan saturasi rendah dari Transistor Bipolar. Dalam gambar, IGBT mendominasi sebagian besar struktur rangkaian karena efisiensinya dalam menangani tegangan dan arus besar pada sistem industri.

- MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor): Sebagaimana dicatat dalam gambar ("Untuk daya lebih kecil"), MOSFET digunakan pada aplikasi dengan kapasitas daya yang lebih rendah namun membutuhkan kecepatan pensaklaran yang sangat tinggi. MOSFET cenderung lebih dingin dan efisien pada beban ringan.



Gambar 2. 6 Rangkain Inverter DC to AC

Jadi hubungan antara VFD di sistem refrigerant ini sangat penting di era moderenisasi industri pendingin yang sangat signifikan karena manfaat penerapan dan fungsi Teknik control VFD pada kompresor refrigerant sebagai berikut:

1. Efesiensi energi

Kompresor bekerja dengan metode fixed speed (kecepatan tetap). Artinya, kompresor hanya punya dua kondisi:mati dan menyala 100%. Untuk mengatur kapasitas,biasanya digunakan katup pengatur yang membuang energi secara percuma, jadi dengan sistem kendali kecepatan, motor kompresor hanya berputar sesuai dengan beban yang dibutuhkan, jadi jika beban pendingin atau kebutuhan udara berkurang maka kecepatan motor melambat secara proporsional. Dampaknya mengurangi pemborosan listrik secara signifikan karena konsumsi daya motor berbanding lurus dengan pangkattiga dari kecepatannya (hukum afinitas).

2. Stabilitas Tekanan Suction dan Discharge

Dalam sistem mekanis lama, tekanan seringkali naik turun (fluktasi) karena kompresor harus sering mati-nyala untuk menjaga tekanan dalam rentang tertentu. Sistem kendali otomatis melakukan penyesuaian halus secara terus menerus (continuous modulation). Ini menjaga tekanan isap (suction) dan tekanan buang (discharge) tetap konsisten pada titik stel (setpoint) yang diinginkan. Maka dampaknya proses produksi atau pendinginan menjadi lebih stabil, yang sangat krusial bagi industri yang membutuhkan presisi suhu atau tekanan tinggi.

3. Pengurangan Konsumsi Daya Puncak

Saat motor listrik berukuran besar dinyalakan, terjadi lonjakan arus listrik yang disebut inrush current, lonjakan ini bisa mencapai 5 hingga 8 kali lipat dari arus operasional normal. Teknologi kendali memungkinkan soft start, motor dijalankan dari frekuensi 0 Hz dan ditingkatkan secara bertahap. Maka dengan menghindari denda biaya beban puncak dari penyedia listrik (PLN) dan mencegah penurunan tegangan (voltage dip) yang bisa mengganggu peralatan elektronik lain dilokasi yang sama.

4. Pengurangan Start/Stop Mekanis

Siklus mati nyala yang terlalu sering adalah musuh utama mesin. Setiap kali mesin menyala, terjadi gesekan besar dan hentakan torsi pada komponen internal. Alih-alih mematikan mesin pada saat beban rendah, sistem kendali hanya menurunkan kecepatan ke level minimum. Dampaknya mengurangi keausan pada bantalan (bearings),piston,dan crank saft kompresor. Hal ini juga mengurangi beban termal pada lilitan motor listrik.

5. Menjaga Umur Kompresor

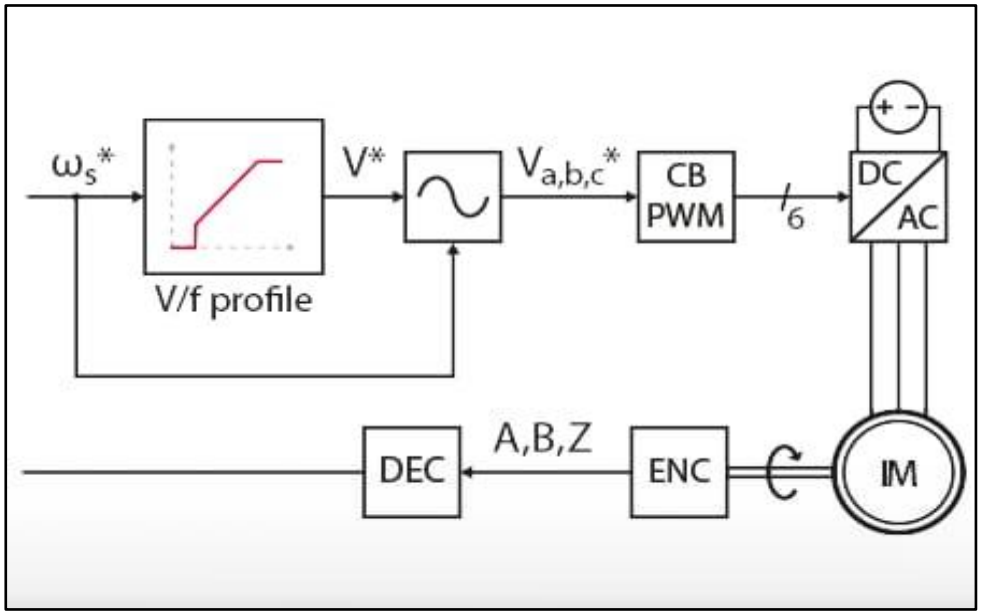
Poin ini adalah hasil dari akumulasi dari semua poin di atas, umur teknis dari sebuah mesin sangat bergantung pada seberapa stabil operasinya. Dengan meminimalkan getaran, menghindari lonjakan panas pada saat startup,dan menjaga pelumasan tetap stabil melalui puataran yang diatur, stres mekanis pada unit berkurang drastis. Dampaknya yaitu memperpanjang interval perawatan (maintenance), mengurangi resiko kerusakan mendadak (breakdown), dan secara keseluruhan memperlama masa pakai investasi aset kompresor.

Konfigurasi penerapan kontrol pada Inverter pengontrolan VFD pada motor sebagai berikut:

1. V/F Control (Volt Per Hertz Control)

V/f Control adalah teknik kontrol paling sederhana dan paling umum digunakan. Prinsipnya adalah menjaga rasio tegangan terhadap frekuensi tetap konstan untuk menjaga fluks magnetik pada motor tetap stabil, karena performa torsi motor induksi sangat bergantung pada kekuatan fluks magnetik tersebut. Jika frekuensi diturunkan (untuk memperlambat motor) tanpa menurunkan tegangan, fluks akan meningkat tajam hingga menyebabkan saturasi magnetik pada inti besi motor, yang mengakibatkan panas berlebih. Sebaliknya, jika frekuensi dinaikkan tanpa menaikkan tegangan, fluks akan melemah dan motor akan kehilangan torsi. Oleh karena itu, rasio V/f harus dijaga agar tetap konstan. alur kerjanya adalah sebagai berikut:

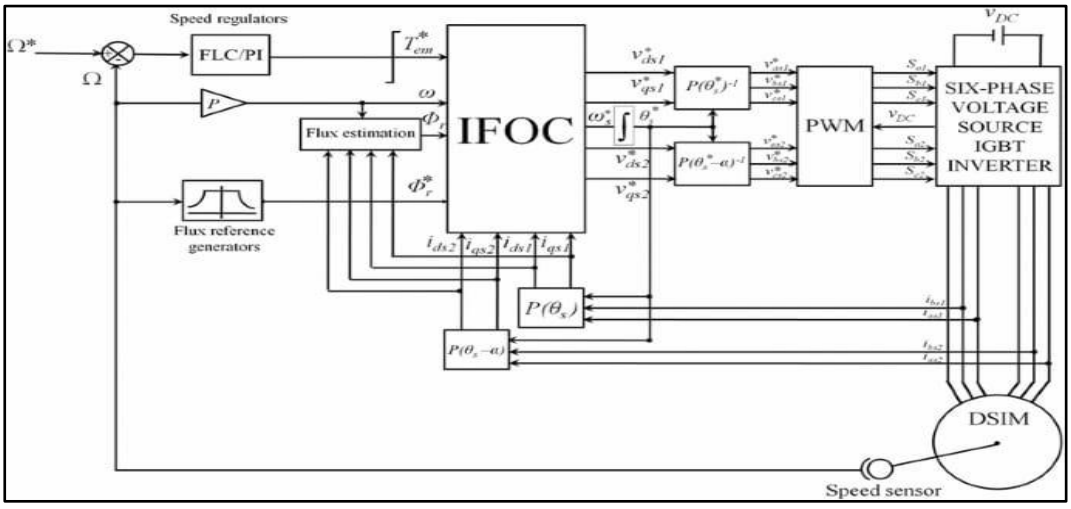
- ϙ*s (Kecepatan Referensi): Input ini menentukan seberapa cepat motor harus berputar.
- V/f Profile: Blok ini menghitung berapa tegangan (V*) yang dibutuhkan berdasarkan frekuensi yang diminta. Perhatikan adanya "tekukan" di awal grafik *(Boost Voltage);* ini digunakan untuk mengatasi hambatan stator pada kecepatan rendah agar motor tetap bisa *start* dengan beban.
- *Oscillator/Integrator*: Mengubah referensi kecepatan menjadi sinyal sinusoidal fase (V*a,b,c).
- CB-PWM *(Carrier-Based Pulse Width Modulation):* Mengonversi sinyal kontrol menjadi pulsa-pulsa *switching* digital untuk menggerakkan saklar daya pada inverter.
- DC/AC Inverter: Mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) dengan magnitudo dan frekuensi variabel menuju IM (Induction Motor).
- ENC & DEC *(Encoder & Decoder):* Ini menunjukkan sistem *Closed-Loop.* Sensor kecepatan *(encoder)* mengirimkan umpan balik posisi (A, B, Z) ke dekoder untuk memastikan kecepatan aktual motor sesuai dengan target ϙ*s.



Gambar 2. 7 DTC (Direct Torque Control)

2. Vector Control (Field Oriented Control / FOC)

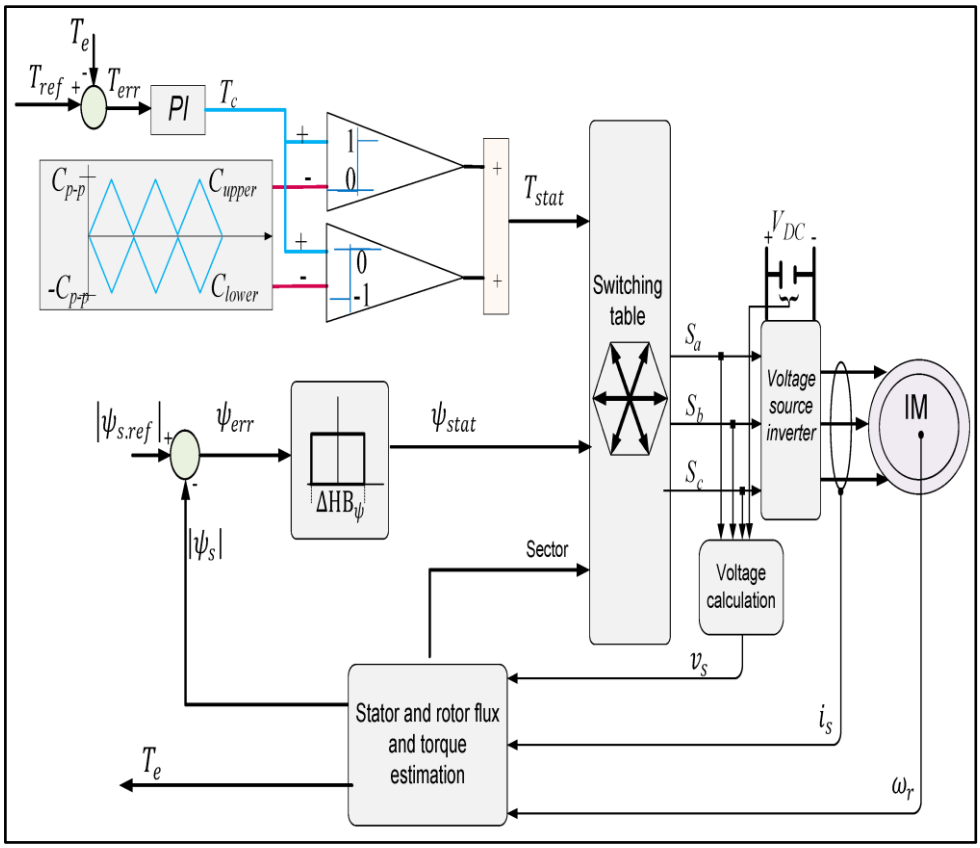
Vector Control adalah teknik kontrol yang lebih canggih, dirancang untuk memberikan performa kontrol kecepatan dan torsi yang mirip motor DC, yaitu dengan mengontrol komponen fluks dan komponen torsi secara terpisah, Vector control melakukan transformasi matematis *(Park/Clarke transformation)* sehingga kedua komponen ini dapat dikontrol secara independen. Akibatnya, motor dapat merespons perintah kecepatan dan beban sangat cepat dan presisi.



Gambar 2. 8 FOC (Field Oriented Control)

3. Direct Torque Control (DTC)

Direct Torque Control adalah teknik kontrol modern yang mengontrol torsi dan fluks motor secara langsung tanpa perlu transformasi kordinat seperti pada vector *control*. Torsi dan fluks dihitung secara langsung dari tegangan dan arus stator, kemudian inverter memilih pola *switching* yang paling tepat untuk mempertahankan torsi dan fluks memilih pola switching yang paling tepat untuk mempertahankan torsi dan fluks pada nilai referensi. Dengan teknik kontrol performa tinggi yang digunakan pada penggerak motor AC, khususnya Motor Induksi (IM) dan *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM). Berbeda dengan metode *Field Oriented Control* (FOC) yang membutuhkan transformasi koordinat kompleks (seperti transformasi Park dan Clarke) serta modulasi lebar pulsa (PWM), DTC bekerja dengan cara mengontrol nilai torsi dan fluks stator secara langsung. Prinsip Kerja dan Mekanisme Pada sistem DTC, estimasi torsi elektromagnetik dan fluks stator dilakukan secara real-time berdasarkan pengukuran tegangan dan arus stator. Nilai estimasi ini kemudian dibandingkan dengan nilai referensi melalui pengontrol histeresis (*hysteresis comparators*).



Gambar 2. 9 DTC (Direct Torque Control)

Secara prinsip, motor AC berputar berdasrkan frekuensi suplai listrik. Semakin tinggi frekuensi, semakin cepat putaran motor. Karena itu, dengan mengontrol frekuensi, VFD dapat mengatur kecepatan motor secara fleksibel sesuai kebutuhan beban yang bervariasi sesuai permintaan, agar sistem dan energi listrik seimbang dan berjalan secara optimal.

Motor yang bekerja dengan VFD cenderung memiliki efisiensi lebih tinggi karena dapat ber-operasi pada titik beban optimal.

Parameter Yang Mempengaruhi Efesiensi Sistem, Beberapa faktor utama:

1. Frekuensi kerja motor.
2. Slip dan beban motor.
3. Tekanan refrigerant.
4. Suhu ruang dan suhu evaporator.
5. Kecepatan kompresor.
6. Beban pendinginan actual.

Penerapan di industri pendingin sebagai efektifitas sebagai berikut:

1. Mengatur kecepatan sesuai kebutuhan beban panas

   Yaitu Ketika beban pendingin rendah, kecepatan motor diturunkan dengan demikian konsumsi daya yang di perlukan oleh motor akan turun drastis sejalan dengan tekanan refrigerant.
2. Mengurangi arus start

   Menghindari lonjakan 5-7 kali arus normal karena start awal tidak konstan maka energi yang di perlukan motor tidak full di atur oleh frekuensi.
3. Menghilangkan *on/off cycling*

   Yaitu kompresor bekerja lebih stabil oleh karena itu part mekanikal yang ada dalam kompresor tidak mudah mengalami kerusakan.
4. Tekanan optimal

   Torsi lebih halus dan stabil dalam sistem pengunaan di industri pendingin.

Hubungan Variable Frequency Drive (VFD) dengan kinerja motor kompresor yaitu:

- Laju aliran refrigerant.
- Tekanan discharge.
- Kapasitas pendinginan.

Pengaturan frekuensi dan tegangan melalui VFD tidak hanya meningkatkan kendali kecepatan motor tetapi juga secara langsung menurunkan rugi-rugi energi sehingga sangat cocok diterapkan pada sistem pendingin yang memiliki karakteristik beban dinamis seperti kompresor refrigerant. motor kompresor sebesar 10–15 Hz dapat menurunkan konsumsi listrik hingga 20% tanpa mengurangi kualitas pendinginan.

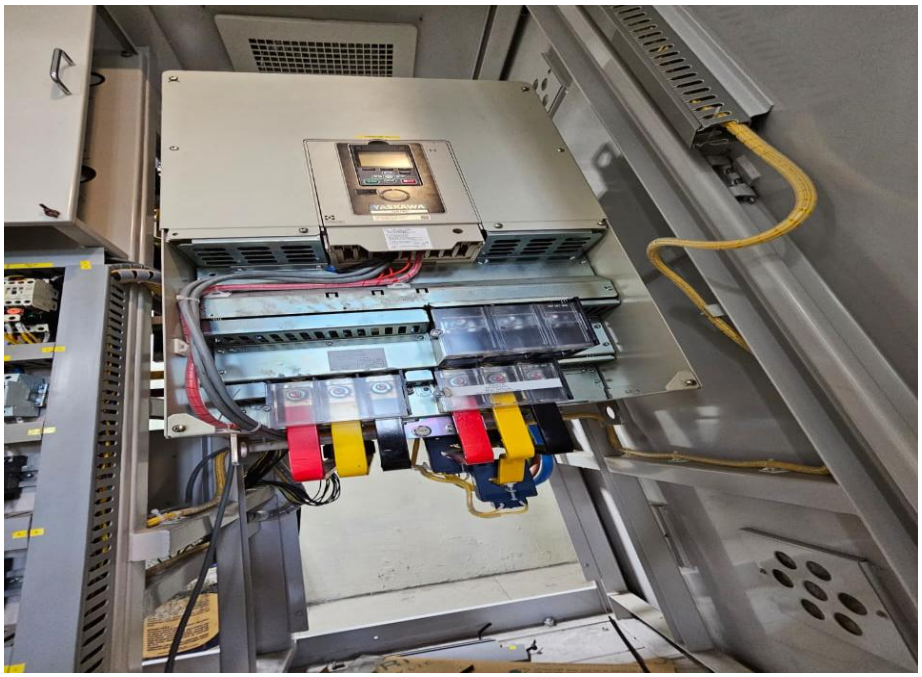
Jika VFD menurunkan konsumsi listrik kompresor Watt (W), maka *Coefficient Of Performance* (COP) meningkat. Yang dimaksud *Coefficient Of Performanc*e (COP) meningkat yaitu ketika suatu suhu mencapai target yang diinginkan maka beban persial yang dihisap kompresor menjadi semakin ringan, oleh karena itu maka kinerja motor tiga fasa sebagai penarik kompresor tidak terlalu berat dan energi yang di butuhkan tidak terlalu banyak. Disinilah VFD di butuhkan sebagai pengatur kecepatan motor dengan menurunkan frekuensi dan terjadilah putaran motor yang slow sesuai beban refrigerant pada sistem dan kompresor. Penggunaan VFD juga memungkinkan penerapan sistem kontrol otomatis berbasis suhu atau tekanan pada sistem refrigerasi. Sensor suhu dan tekanan dapat diintegrasikan dengan VFD sehingga kecepatan motor kompresor dapat menyesuaikan kondisi aktual di lapangan. Sebagai contoh, ketika suhu ruang pendingin telah mendekati setpoint, maka frekuensi yang diberikan oleh VFD akan diturunkan sehingga putaran motor melambat. Hal ini berdampak langsung pada pengurangan konsumsi energi listrik serta menjaga kestabilan suhu agar tidak terjadi fluktuasi yang signifikan.

Dalam penerapannya, pemilihan VFD harus disesuaikan dengan spesifikasi motor induksi yang digunakan, seperti daya (kW), tegangan, arus nominal, serta karakteristik beban. Parameter penting seperti frekuensi minimum, frekuensi maksimum, dan waktu akselerasi serta deselerasi juga harus diatur dengan tepat agar sistem dapat bekerja secara optimal dan tidak menimbulkan gangguan pada jaringan listrik.

Dengan demikian, kombinasi antara motor induksi tiga fasa dan VFD merupakan solusi yang efektif dalam meningkatkan efisiensi, keandalan, dan fleksibilitas sistem refrigerasi modern. Teknologi ini tidak hanya mampu

mengurangi konsumsi energi, tetapi juga memberikan kontrol yang lebih baik terhadap performa sistem secara keseluruhan.

Oleh karena itu pengaruh penerapan VFD terhadap efektifitas dan efesiensi energi pada motor tiga fasa kompresor refrigerant pada lingkungan industri pendingin semakin diminati dengan penerapan inverter VFD sebagai pengendali dari motor tiga fasa penggerak kompresor refrigerant. Berikut Inverter VFD yang di amati saat penelitan di PT. Winson Cold Storage.



Gambar 2. 10 Unit Inverter VFD

(PT.Winson Cold Storage)

2.2.3 Sistem Refrigrasi Pendingin

Sistem refrigerasi adalah suatu sistem termodinamika yang berfungsi untuk memindahkan kalor atau panas dari suatau ruangan atau proses pemindahan panas dari daerah ber-temperatur tinggi ke daerah ber-temperatur rendah menggunakan refrigerant sebagai media perpindahan panas. Proses ini berlangsung dengan bantuan fluida kerja yang disebut refrigerant, yang memiliki sifat mudah menyerap dan melepaskan panas melalui perubahan fase dari cair ke-gas maupun sebaliknya. Prinsip kerja sistem refrigerasi ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi

industri, seperti cold storage, air conditioning dan proses pembekuan cepat *(blast freezer).*

Secara umum, sistem refrigerasi bekerja berdasarkan siklus kompresi uap *(vapor compression cycle)*, yang terdiri dari empat proses utama yaitu kompresi, kondensasi, ekspansi, dan evaporasi. Keempat proses ini berlangsung secara berulang dalam suatu sistem tertutup sehingga menghasilkan efek pendinginan yang kontinu. Laju aliran massa refrigerant diatur dan dikompresi oleh unit kompresor untuk meningkatkan tekanan dan suhunya sebelum masuk ke siklus kondensi, Proses ini melibatkan empat komponen utama yaitu: Kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator.

Kompresor merupakan jantung sistem pendingin. Fungsinya yaitu adalah:

- Menghisap refrigerant bertekanan rendah dari evaporator.
- Mengompresi refrigerant menjadi tekanan tinggi.
- Mengalirkam refrigerant menuju kondensor untuk melepaskan panas.

Pada tahap kompresi, refrigerant dalam bentuk uap bertekanan rendah dari evaporator dihisap oleh kompresor. Kompresor kemudian menaikkan tekanan dan temperatur refrigerant sehingga menjadi uap bertekanan tinggi. Proses ini sangat penting karena menentukan kemampuan sistem dalam memindahkan panas ke lingkungan luar. Semakin tinggi tekanan yang dihasilkan, maka semakin besar pula kemampuan refrigerant untuk melepaskan panas pada kondensor. Selanjutnya, refrigerant bertekanan tinggi mengalir menuju kondensor. Di dalam kondensor, refrigerant melepaskan panas ke lingkungan sekitar, biasanya melalui media udara atau air pendingin. Akibat pelepasan panas ini, refrigerant mengalami perubahan fase dari gas menjadi cair bertekanan tinggi. Proses kondensasi ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti suhu udara luar dan efisiensi heat exchanger yang digunakan.

Refrigerant cair bertekanan tinggi kemudian melewati katup ekspansi atau expansion valve. Pada komponen ini terjadi penurunan tekanan secara drastis yang menyebabkan temperatur refrigerant ikut turun. Proses ini bersifat isenthalpic, dimana tidak terjadi perubahan entalpi secara signifikan, namun terjadi perubahan kondisi fisik refrigerant menjadi campuran cair dan gas dengan temperatur rendah. Tahap terakhir adalah proses evaporasi yang terjadi di evaporator. Refrigerant yang

telah bertekanan rendah dan bersuhu dingin menyerap panas dari lingkungan atau produk yang didinginkan. Akibatnya, refrigerant menguap kembali menjadi gas dan siklus berulang kembali ke kompresor. Proses inilah yang menghasilkan efek pendinginan pada sistem refrigerasi.

Keempat komponen utama dalam sistem refrigerasi memiliki peran yang saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan. Kompresor berfungsi sebagai penggerak utama aliran refrigerant, kondensor sebagai pelepas panas, katup ekspansi sebagai pengatur aliran dan tekanan, serta evaporator sebagai penyerap panas dari objek yang didinginkan.

Dalam aplikasi industri, khususnya pada cold storage, sistem refrigerasi sering dikombinasikan dengan penggunaan motor listrik tiga fasa yang dikendalikan menggunakan inverter atau VFD. Penggunaan VFD memungkinkan pengaturan kecepatan putaran motor kompresor sehingga kapasitas pendinginan dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban. Hal ini memberikan keuntungan berupa efisiensi energi yang lebih tinggi, pengurangan beban mekanis pada peralatan, serta peningkatan umur operasional sistem. Selain itu, pengaturan frekuensi pada VFD juga berpengaruh terhadap laju aliran massa refrigerant yang bersirkulasi dalam sistem. Pada frekuensi tinggi, kompresor akan bekerja lebih cepat sehingga laju aliran refrigerant meningkat dan proses pendinginan menjadi lebih cepat. Sebaliknya, pada frekuensi rendah, sistem akan bekerja lebih stabil dengan konsumsi energi yang lebih rendah, namun waktu pendinginan menjadi lebih lama. Dalam sistem refrigerasi modern, VFD juga memungkinkan integrasi dengan sistem kontrol otomatis berbasis sensor, seperti sensor suhu, tekanan, maupun kelembaban. Sensor-sensor tersebut akan memberikan umpan balik (feedback) secara real-time kepada sistem kontrol, sehingga frekuensi yang dihasilkan oleh VFD dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban pendinginan yang aktual. Sebagai contoh, ketika suhu ruang pendingin masih tinggi, maka VFD akan mengoperasikan motor pada frekuensi yang lebih tinggi untuk meningkatkan kapasitas pendinginan. Sebaliknya, ketika suhu sudah mendekati nilai setpoint, frekuensi akan diturunkan sehingga konsumsi energi menjadi lebih hemat dan sistem tetap bekerja secara stabil.

Efisiensi sistem refrigerasi juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis refrigerant yang digunakan, kondisi beban pendinginan, kebersihan heat exchanger, serta kestabilan suplai listrik. Oleh karena itu, diperlukan perawatan dan pengoperasian yang optimal agar sistem dapat bekerja dengan performa terbaik. Dengan memahami prinsip kerja dan karakteristik sistem refrigerasi secara mendalam, diharapkan dapat dilakukan optimasi pengoperasian sistem sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi dan performa pendinginan secara keseluruhan.

Dalam penelitian ini, sistem refrigerasi yang diamati merupakan bagian dari fasilitas pendinginan di PT. Winson Cold Storage, yang digunakan untuk menjaga kualitas produk dengan suhu tertentu. Pengamatan difokuskan pada pengaruh variasi frekuensi terhadap kinerja sistem, termasuk konsumsi daya, laju penurunan suhu, serta efisiensi operasional.



Gambar 2. 11 Sistem Refrigerasi

(PT.Winson Cold Storage)

2.2.4 Suhu Ruangan

Suhu ruangan merupakan salah satu parameter penting dalam sistem refrigerasi karena menunjukkan kondisi termal suatu ruang yang akan didinginkan. Suhu dapat didefinisikan sebagai ukuran tingkat panas atau dinginnya suatu benda atau lingkungan. Dalam sistem pendingin, suhu ruangan menjadi salah satu indikator utama untuk mengetahui kemampuan sistem refrigerasi dalam mempertahankan kondisi ruang sesuai dengan temperatur yang diinginkan. Pada sistem refrigerasi, proses penurunan suhu ruangan terjadi melalui perpindahan kalor dari ruang yang didinginkan menuju refrigeran. Refrigeran menyerap kalor pada evaporator sehingga temperatur ruang dapat mengalami penurunan. Kalor yang telah diserap oleh refrigeran kemudian dibawa menuju kompresor dan diteruskan ke kondensor untuk dilepaskan ke lingkungan.

Suhu ruangan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti beban panas dari produk yang didinginkan, kondisi lingkungan sekitar, jumlah produk di dalam ruang, frekuensi keluar-masuknya udara, karakteristik isolasi ruangan, serta kinerja sistem refrigerasi. Semakin besar beban panas yang masuk ke dalam ruang, semakin besar pula kemampuan pendinginan yang dibutuhkan untuk mempertahankan suhu pada nilai yang ditentukan, suhu ruangan digunakan sebagai salah satu parameter untuk mengetahui efektivitas kinerja motor tiga fasa kompresor refrigerant dengan penerapan VFD. Perubahan frekuensi yang diberikan oleh VFD akan mengubah kecepatan putaran motor kompresor. Perubahan kecepatan tersebut memengaruhi kapasitas kerja kompresor dan laju sirkulasi refrigeran dalam sistem. Dengan demikian, perubahan frekuensi motor dapat memengaruhi kecepatan penurunan dan kestabilan suhu ruangan.

Hubungan antara suhu ruangan dan kinerja sistem pendingin dapat dianalisis berdasarkan perubahan suhu terhadap waktu. Salah satu parameter yang dapat digunakan adalah laju penurunan suhu, yaitu perubahan suhu yang terjadi dalam interval waktu tertentu:

$$\Delta T = T_{awal} - T_{akhir}$$

$$Laju = \frac{\Delta T}{Waktu}$$

Keterangan:

- suhu awal ruangan (°C)
- suhu akhir ruangan (°C)
- interval waktu pengukuran (jam atau menit)

Semakin besar nilai laju penurunan suhu, semakin cepat ruangan mencapai temperatur yang diinginkan. Namun, efektivitas sistem tidak hanya ditentukan oleh cepatnya penurunan suhu, tetapi juga harus mempertimbangkan konsumsi daya listrik motor, arus motor, frekuensi VFD, serta kestabilan suhu ruangan.

Oleh karena itu, suhu ruangan merupakan parameter penting dalam penelitian ini karena dapat digunakan untuk mengevaluasi respons sistem pendingin terhadap perubahan frekuensi VFD. Data suhu ruangan yang diperoleh pada beberapa variasi frekuensi dapat dibandingkan dengan data arus motor, daya listrik, dan waktu pendinginan. Hasil perbandingan tersebut dapat digunakan untuk menentukan kondisi operasi VFD yang memberikan kinerja pendinginan efektif dengan penggunaan energi yang lebih optimal.



Gambar 2.12 Suhu Ruangan

(PT.Winson Cold storage)

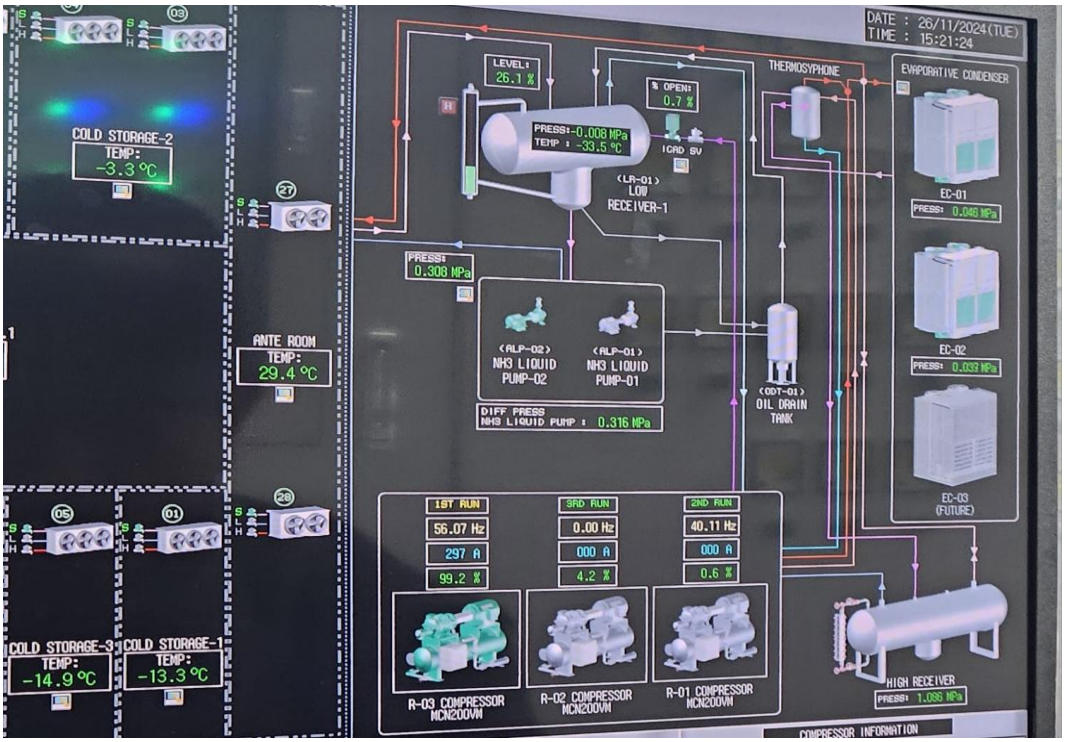
2.2.5 Debit Refrigerant

Debit refrigeran merupakan salah satu parameter penting dalam sistem refrigerasi karena menunjukkan jumlah refrigeran yang mengalir melalui suatu penampang saluran dalam satuan waktu. Besarnya debit refrigeran dipengaruhi oleh karakteristik sistem, terutama kapasitas kompresor, kecepatan putaran kompresor, kondisi tekanan dan temperatur refrigeran, serta pengaturan aliran pada sistem refrigerasi. Pada sistem pendingin kompresi uap, refrigeran bersirkulasi melalui beberapa komponen utama, yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Kompresor berfungsi menghisap refrigeran dari evaporator dan meningkatkan tekanan refrigeran sebelum dialirkan menuju kondensor. Oleh karena itu, perubahan kecepatan putaran kompresor akan memengaruhi jumlah refrigeran yang dapat disirkulasikan dalam sistem.

Jumlah debit refrigerant yang dipindahkan kompresor dalam setiap putaran relatif berkaitan dengan volume perpindahan kompresor. Dalam kondisi nyata, debit aktual tidak sama dengan debit teoritis karena terdapat volumetric efficiency, kebocoran internal, kondisi tekanan suction, temperatur refrigeran, dan karakteristik kompresor, ketika putaran kompresor dinaikkan, kemampuan kompresor untuk memindahkan refrigeran per satuan waktu pada umumnya meningkat. Sebaliknya, penurunan putaran akan menurunkan laju sirkulasi refrigeran. Perubahan frekuensi VFD akan menyebabkan perubahan putaran motor kompresor. Perubahan putaran tersebut kemudian memengaruhi kemampuan kompresor dalam mensirkulasikan refrigeran. Perubahan laju aliran refrigeran selanjutnya dapat memengaruhi tekanan suction, tekanan discharge, temperatur refrigeran, kapasitas pendinginan, serta konsumsi daya motor. Secara umum, hubungan tersebut dapat digambarkan sebagai: Frekuensi VFD → Putaran Motor → Putaran Kompresor → Debit/Laju Massa Refrigeran → Kapasitas Pendinginan → Konsumsi Energi → Efektivitas Sistem. Oleh karena itu, pengaturan debit refrigeran melalui pengaturan kecepatan kompresor menggunakan VFD dapat menjadi salah satu cara untuk memperoleh kondisi operasi yang lebih sesuai dengan kebutuhan beban pendinginan. Pengoperasian kompresor pada kecepatan yang sesuai dapat menghindari kerja kompresor yang berlebihan ketika beban

pendinginan rendah sekaligus mempertahankan kapasitas pendinginan ketika beban meningkat.

Pada sistem dengan kompresor yang digerakkan motor tiga fasa dan dikendalikan VFD, perubahan frekuensi VFD memengaruhi putaran motor dan kompresor, yang selanjutnya memengaruhi debit volumetrik dan laju aliran massa refrigeran. Perubahan laju aliran massa tersebut berpengaruh terhadap kapasitas pendinginan dan kebutuhan daya kompresor.



Gambar 2.13 Debit Refrigerant

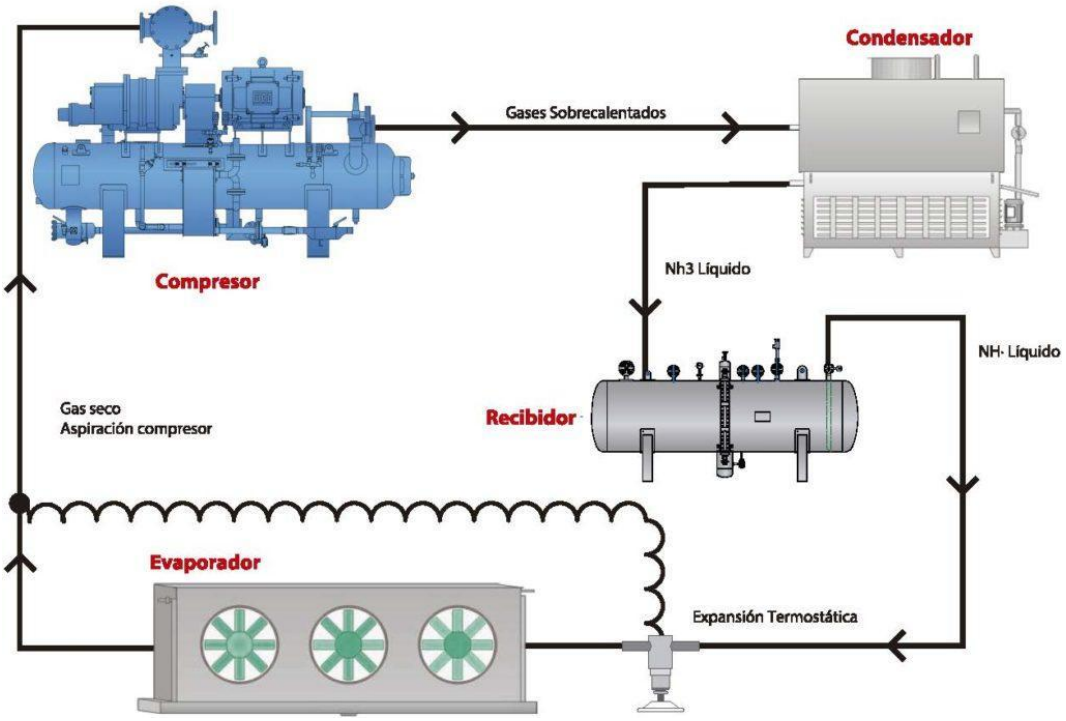
(PT.Winson Cold Storage)

2.2.6 Aliran Massa Refrigerant

Aliran massa refrigeran (*mass flow rate*) adalah jumlah massa refrigeran yang mengalir melewati suatu penampang pipa atau komponen sistem refrigerasi dalam setiap satuan waktu. Aliran massa merupakan salah satu parameter penting dalam sistem pendingin karena menunjukkan seberapa banyak refrigeran yang bersirkulasi dari satu komponen ke komponen lainnya dalam satuan waktu. Dalam sistem refrigerasi, refrigeran bekerja sebagai media yang membawa dan memindahkan energi panas. Refrigeran menyerap panas dari ruang atau produk yang didinginkan pada evaporator, kemudian membawa panas tersebut menuju

kondensor untuk dilepaskan ke lingkungan. Agar proses perpindahan panas tersebut berlangsung secara kontinu, refrigeran harus bersirkulasi melalui sistem dengan jumlah dan laju aliran tertentu. Oleh karena itu, besar kecilnya aliran massa refrigeran sangat berpengaruh terhadap kapasitas pendinginan dan kinerja kompresor.

Ketika frekuensi VFD diturunkan, kecepatan putar motor juga cenderung menurun. Pada kompresor yang kapasitasnya mengikuti kecepatan putar, penurunan kecepatan kompresor dapat menyebabkan jumlah refrigeran yang dipindahkan per satuan waktu ikut menurun. Sebaliknya, ketika frekuensi dinaikkan dalam batas operasi yang diizinkan, kecepatan kompresor meningkat sehingga kapasitas perpindahan refrigeran dapat meningkat. Dengan demikian, aliran massa refrigeran merupakan salah satu parameter penting dalam menganalisis efektivitas kinerja kompresor dan sistem pendingin. Pada sistem yang menggunakan VFD, perubahan frekuensi dapat mengubah kecepatan motor dan kompresor, yang selanjutnya dapat memengaruhi kapasitas sirkulasi refrigeran, aliran massa, kapasitas pendinginan, daya listrik, dan efisiensi sistem.



Gambar 2.14 Debit Refrigerant

(PT.Winson Cold Storage)

2.2.7 Set Point

Dalam sistem kontrol pendingin berbasis inverter VFD yang menggerakkan motor tiga fasa pada kompresor, set point berfungsi sebagai parameter acuan utama *(reference input)* dalam mekanisme kontrol lup tertutup *(closed-loop control).* Terjadinya deviasi atau error antara nilai set point yang ditargetkan (seperti suhu ruangan atau tekanan suction) dengan variabel proses aktual yang terbaca oleh sensor akan memicu controller untuk mengirimkan sinyal kendali ke VFD. Selanjutnya, VFD mengatur frekuensi dan tegangan daya masuk ke motor tiga fasa secara presisi guna menyesuaikan kecepatan putar kompresor dan laju aliran massa refrigeran secara dinamis.

Peran set point sangat sentral dalam menganalisis efektivitas dan efisiensi energi motor penggerak kompresor. Berbeda dengan sistem konvensional ON-OFF yang memicu arus awal *(inrush current)* berulang kali setiap kali sistem menyala untuk mengejar set point, integrasi VFD memungkinkan motor tiga fasa bertransisi secara halus *(soft starting)* serta beroperasi pada kapasitas parsial saat kondisi pendinginan sudah mendekati target. Hal ini secara langsung mempengaruhi variabel kinerja elektrikal motor, seperti penurunan konsumsi daya listrik, perbaikan faktor daya *(power factor),* dan peningkatan nilai rasio efisiensi termodinamika *(Coefficient of Performance / COP)* pada sistem refrigerasi.

Variasi set point yang diterapkan dapat digunakan untuk mengukur laju penurunan suhu *(pull-down rate)* serta menguji seberapa responsif motor tiga fasa dalam mempertahankan kestabilan sistem saat terjadi perubahan beban pendinginan (thermal load variation). Indikator-indikator tersebut memberikan data kuantitatif yang valid untuk membuktikan seberapa besar efektivitas penggunaan VFD terhadap optimalisasi kerja motor tiga fasa pada sistem refrigerasi. Pengintegrasian set point ke dalam strategi kendali juga berpengaruh langsung terhadap keandalan mekanis dan tingkat keausan komponen motor tiga fasa beserta kompresor. Pengoperasian motor secara kontinyu dengan kecepatan rasional mendekati nilai set point mampu meminimalkan lonjakan torsi mekanis *(mechanical shock)* yang lazim terjadi pada siklus start-stop secara mendadak. Hal ini tidak hanya meminimalkan risiko stres termal pada belitan stator *(stator winding)* akibat variasi

arus ekstrem, melainkan juga menjaga kestabilan aliran pelumas *(oil return)* di dalam sistem sirkulasi refrigeran.

Dari sudut pandang analisis termodinamika dan kendali otomatis, tingkat akurasi respons sistem terhadap set point menjadi tolok ukur transient response dan *steady-state error* dari motor penggerak. Saat terjadi lonjakan beban pendinginan mendadak *(load disturbance),* seberapa cepat VFD dapat menyesuaikan frekuensi motor tiga fasa untuk mengembalikan parameter sistem ke set point awal menunjukkan tingkat keandalan *(robustness)* dari sistem kontrol yang dirancang. Secara keseluruhan, set point tidak sekadar menjadi angka batasan operasi, melainkan acuan analitis untuk mengkuantifikasi optimalisasi kinerja sistem secara menyeluruh. Keterkaitan antara pengaturan set point, respons frekuensi VFD, dan variasi pembebanan motor tiga fasa menjadi pondasi utama dalam membuktikan bahwa penerapan kendali inverter mampu menghasilkan sistem refrigerasi yang tidak hanya presisi secara temperatur, namun juga efisien secara konsumsi energi dan andal secara mekanis.



Gambar 2.15 Set Point

(PT.Winson Cold Storage)

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperemental kuantitatif, yang secara spesifik dirancang untuk menguji pengaruh variabel independen dalam kondisi yang terkontrol. Fokus utama dari desain ini Adalah untuk mengukur secara langsung dampak penerapan *inverter Variable Frequency Drive* (VFD) terhadap kinerja motor induksi tiga fasa yang mengerakkan kompresor refrigerant pada industry pendingin. Metode eksperemential dipilih karena memungkinkan penelitian untuk melakukan manipulasi terhadap frekuensi input melalui VFD dan mengamati perubahan yang terjadi pada parameter performa motor secara presisi. Pendekatan kuantitatif diterapkan melalui pengumpulan data numerik yang diperoleh dari alat ukur (seperti *power meter*, *tachometer*, dan sensor tekanan) yang kemudian dianalisis secara statistik untuk menarik kesimpulan yang objektif.

3.2 Lokasi dan Waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada salah satu fasilitas industri pendingin skal besar *(Cold Storage / Chiller Plant)* yang beroperasi menggunakan sistem kompresor refrigerant berbasis motor induksi tiga fasa. Pemilihan lokasi ini didasarkan relevansi fasilitas terhadap objek utama yang memiliki beban kerja kontinu. Kondisi operasional di lokasi tersebut memungkinkan penelitian untuk mengamati perilaku motor secara nyata *(real-time)* dalam berbagai fluktasi beban pendingin. Selain itu, ketersediaan instrumen pendukung di fasilitas ini memudahkan peroses intergrasi alat ukur dan pengambilan data parameter elektrikal maupun mekanikal yang di perlukan untuk mendukung validitas hasil penelitan ini.

Pelaksanaan penelitian ini direncanakan berlangsung dalam kurun waktu yang terukur, dimulai tepat 3 (tiga) bulan setelah terlaksananya seminar proposal sebagai titik awal pengerjaan teknis. Pembagian waktu penelitian mencakup beberapa tahapan krusial sebagai berikut:

- Tahap Persiapan: Meliputi observasi lapangan, kalibrasi instrumen pengukuran, dan koordinasi dengan pihak teknisi fasilitas industri terkait prosedur keselamatan kerja.

- Tahap Pengambilan Data: Dilakukan secara intensif untuk menangkap variasi data yang representatif terhadap siklus kerja mesin pendingin. Jangka waktu tiga bulan dinilai sangat memadai untuk mengumpulkan dataset yang komprehensif, mulai dari arus start, tegangan kerja, hingga efisiensi motor pada kondisi beban tertentu.

- Tahap Analisis dan Penyusunan: Setelah data terkumpul, dilakukan proses pengolahan data menggunakan metode perhitungan teoritis maupun simulasi untuk mendapatkan kesimpulan yang akurat.

Dengan alokasi waktu tersebut, diharapkan penulisan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan kedalaman analisi yang objektif dan memenuhi standar akademik yang ditetapkan.

3.3 Objek Penelitian

Objek penelitian adalah motor induksi tiga fasa digunakan untuk menggerakkan kompresor refrigerant industri. Spesifikasi umum motor:

- Tipe motor : Motor Induksi Tiga Fasa
- Daya nominal : 200 kw
- Tegangan : 380 v
- Frekuensi : 50 Hz
- Kecepatan : 2.982 Rpm
- Tipe Kompresor : Screw N-200

3.4 Variable Penelitian

a. Variable Bebas

- Pengaturan frekuensi VFD (30 Hz, 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, 50 Hz)

b. Variable Terikat

- Laju penurunan suhu (˚C).
- Arus motor amper (A).
- Penggunaan energi / jam (Kwh).
- Temperatur ruangan (˚C).

c. Variable Kontrol

- Jenis dan jumlah refrigerant.
- Beban pendinginan rata – rata.
- Tegangan suplai jaringan listrik.
- Jenis motor dan kompresor yang sama pada setiap pengukuran.

3.5 Alat dan Bahan Penelitian

Penyusunan instrumen penelitian yang tepat merupakan langkah untuk menjamin validitas dan reabilitas data yang dihasilkan dalam penelitian ini, alat dan bahan dipilih berdasarkan standar teknis kelistrikan dan sistem refrigerasi guna mendukung pengujian performa motor kompresor terhadap variasi frekuensi.

3.5.1 Alat Penelitian

Alat penelitian mencakup seluruh perangkat keras dan instrumen pengukuran yang digunakan untuk mengambil data primer di lapangan. Adapun alat-alat tersebut berfungsi sebagai acuan utama dalam memantau parameter fisik maupun elektrikal selama proses pengujian berlangsung. Daftar alat yang digunakan sedemikian rupa untuk membentuk satu kesatuan sistem moonitooring yang akurat, dengan rincian sebagai berikut:

1. KWH Meter Portabel



Gambar 3. 1 KWH Meter

(PT.WINSON COLD STORAGE)

KWH Meter Portabel yang digunakan dalam penelitian ini merupakan instrumen pengukuran elektronik berbasis mikroprosesor yang dirancang untuk memantau parameter kelistrikan pada sistem tiga fasa secara presisi. Penggunaan alat merk Multispan ini (sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.5) bertujuan untuk memvalidasi efisiensi energi pada sistem kompresor refrigerasi yang diintegrasikan dengan VFD. Dalam pengujian ini, KWH meter tidak hanya berfungsi sebagai pencatat akumulasi penggunaan energi (Kwh), tetapi juga sebagai alat monitoring beban aktif secara *real-time* . Hal ini krusial karena beban motor kompresor bersifat dinamis terhadap perubahan frekuensi kerja. Alat ini memungkinkan peneliti untuk:

- Menganalisis Konsumsi Daya Spesifik: Menghitung perbandingan antara beban pendinginan yang dihasilkan dengan energi listrik yang diserap pada setiap tingkat frekuensi (Hz).
- Akurasi Data: Meminimalkan *human error* dalam pembacaan manual berkat tampilan digital LED yang memiliki tingkat presisi tinggi hingga tiga atau empat digit desimal.
- Evaluasi Efisiensi: Menentukan titik kerja paling optimal dari motor kompresor saat dioperasikan dengan berbagai variasi kecepatan melalui *inverter*.

Instrumen ini memproses sinyal arus dari *Current Transformer* (CT) dan sinyal tegangan langsung untuk menghasilkan data sebagai berikut:

- Daya Aktif (Kw): Menunjukkan beban aktual yang sedang digunakan oleh motor pada saat pengujian berlangsung.
- Energi Kumulatif (Kwh): Menunjukkan total konsumsi energi dalam jangka waktu tertentu, yang digunakan untuk menghitung total biaya operasional atau efisiensi jangka panjang.

Penggunaan KWH meter digital sangat penting dalam penelitian yang melibatkan VFD karena karakteristik beban induktif pada motor kompresor akan berubah seiring dengan perubahan frekuensi. Dengan adanya alat ini, fluktuasi daya akibat penurunan frekuensi (misalnya dari 50 Hz ke 30 Hz) dapat terdokumentasi secara akurat, sehingga pengaruh modulasi frekuensi terhadap penghematan energi listrik pada sistem *cold storage* di PT. Winson dapat dihitung secara sistematis.

2. Amper meter



Gambar 3. 2 Amper Meter

(PT.WINSON COLD STORAGE)

Ampermeter merupakan instrumen pengukuran kelistrikan yang krusial dalam penelitian ini, berfungsi sebagai perangkat pemantauan (*monitoring*) arus listrik secara *real-time* yang mengalir pada beban motor induksi tiga fasa penggerak kompresor refrigeran. Penggunaan alat ini bertujuan untuk memastikan bahwa konsumsi arus motor tetap berada dalam batas nominal kerja (FLA - *Full Load Ampere*) dan sebagai indikator deteksi dini apabila terjadi anomali beban berlebih (*overload*). Secara teknis, amperemeter yang digunakan adalah tipe analog dengan skala pengukuran hingga 600A, yang dihubungkan melalui *Current Transformer* (CT) dengan rasio 300/5A.

Hal ini memungkinkan alat untuk mengukur arus besar pada sistem tenaga tiga fasa dengan aman melalui konversi perbandingan arus yang lebih kecil menuju jarum penunjuk. Data yang diperoleh dari pembacaan amperemeter ini sangat penting untuk menganalisis karakteristik performa motor terhadap variasi beban pendinginan pada sistem *cold storage*, serta menjadi parameter pembanding dalam mengevaluasi efisiensi penggunaan energi selama siklus kompresi berlangsung. Fungsi Analitis Tidak hanya sekadar memantau, tapi juga untuk deteksi dini *overload* dan memastikan keamanan motor. *Current Transformer* (CT) berdasarkan keterangan "300/5A" yang terlihat, Korelasi Penelitian Menghubungkan pembacaan arus dengan performa sistem pendingin secara keseluruhan agar relevan.

3. Infrared Thermometer



Gambar 3. 3 Infrared Thermometer

(PT. WINSON COLD STORAGE)

Infrared Thermometer atau termometer inframerah merupakan instrumen pengukuran suhu non-kontak yang digunakan dalam penelitian ini untuk memvalidasi parameter termal pada sistem refrigerasi. Alat ini bekerja dengan memanfaatkan radiasi termal yang dipancarkan oleh objek untuk menentukan suhu permukaannya secara akurat tanpa harus menyentuh objek tersebut secara fisik. Hal ini sangat krusial untuk menjaga keamanan peneliti saat mengambil data pada komponen yang bergerak atau memiliki temperatur ekstrem.

Dalam prosedur pengambilan data, perangkat ini digunakan secara intensif untuk memantau fluktuasi suhu pada beberapa titik kritis, meliputi suhu ambien ruangan *cold storage*, suhu pada bodi kompresor, serta suhu pada pipa saluran *discharge* dan *suction*. Data temperatur yang dihasilkan menjadi variabel kunci untuk menghitung nilai *superheat* dan *subcooling*, yang nantinya digunakan untuk menganalisis performa koefisien kinerja (*Coefficient of Performance*/COP) dari sistem refrigeran. Keunggulan penggunaan teknologi inframerah dalam penelitian ini adalah kemampuannya dalam memberikan respons pembacaan yang cepat dan presisi tinggi, sehingga perubahan suhu sekecil apa pun saat kompresor beroperasi dapat tercatat secara optimal untuk kebutuhan analisis data. Jadi dengan adanya alat ini kitab bisa langsung memantau perubahan suhu yang dihasilkan dari kompresi kompresor yang di jalankan motor induksi tiga fasa dengan penerapan inverter dengan frekuensi yang berbeda serta mengetahui sebrapa efektifitas dari pada kinerja motor kompresor.

4. Human Machine Interface



Gambar 3. 4 Human Machine Interface

(PT.WINSON COLD STORAGE)

Dalam prosedur pengambilan data, perangkat ini digunakan secara intensif untuk memantau fluktuasi suhu pada beberapa titik kritis, meliputi suhu ambien ruangan *cold storage*, suhu pada bodi kompresor, serta suhu pada pipa saluran *discharge* dan *suction*. Data temperatur yang dihasilkan menjadi variabel kunci untuk menghitung nilai *superheat* dan *subcooling*, yang nantinya digunakan untuk menganalisis performa koefisien kinerja (*Coefficient of Performance*/COP) dari sistem refrigeran. Keunggulan penggunaan teknologi inframerah dalam penelitian ini adalah kemampuannya dalam memberikan respons pembacaan yang cepat dan presisi tinggi, sehingga perubahan suhu sekecil apa pun saat kompresor beroperasi dapat tercatat secara optimal untuk kebutuhan analisis data.

Selain fungsi pemantauan kelistrikan, HMI ini menampilkan data mekanis yang sangat spesifik, termasuk tekanan refrigeran dalam satuan Megapascal (MPa) pada sisi *suction* maupun *discharge*. Fitur krusial yang terdapat pada layar ini adalah visualisasi persentase bukaan *slide valve* kompresor, yang menunjukkan kapasitas beban kompresor dalam merespons laju aliran refrigeran dan kebutuhan pendinginan secara otomatis. Melalui panel HMI ini, peneliti dapat melakukan evaluasi terhadap keandalan sistem kontrol, mendeteksi alarm atau kegagalan sistem secara dini, serta mengumpulkan data tren operasional yang diperlukan untuk menganalisis efisiensi termodinamika pada sistem *refrigerant* secara menyeluruh selama pengujian berlangsung.

5. Power Factor Controller



Gambar 3.5 Power Factor Controller

(PT.Winson Cold Storage)

Power Factor Controller pada penelitian ini digunakan sebagai alat bantu untuk memperoleh data faktor daya selama pengoperasian motor kompresor refrigeran. Data faktor daya tersebut selanjutnya digunakan sebagai salah satu parameter dalam menganalisis efektivitas penggunaan energi listrik pada motor tiga fasa kompresor refrigeran dengan penerapan VFD. Berdasarkan hasil pengamatan pada saat penelitian, nilai yang ditampilkan pada alat dapat digunakan untuk mengetahui kondisi faktor daya sistem, dalam pengambilan data, peneliti mencatat nilai faktor daya pada kondisi operasi motor yang berbeda untuk kemudian dicatat dengan parameter lainnya, seperti tegangan, arus, frekuensi, daya listrik, dan konsumsi energi.

3.5.2 Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang memang merupakan komponen atau materi utama yang menjadi objek pengujian, serta media pendukung yang digunakan untuk mendapatkan data penelitian dalam sistem yang di analisis. Dalam penelitian ini, bahan-bahan tersebut memegang peranan penting karena karakteristik fisik dan termodinamikanya akan diukur serta diamati pengaruhnya terhadap kinerja motor induksi dan sistem pendingin secara keseluruhan. Adapun rincian bahan penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Motor induksi tiga fasa



Gambar 3. 6 Motor Induksi Tiga Fasa

(PT.WINSON COLD STORAGE)

Objek utama dalam penelitian ini Adalah motor induksi tiga fasa yang berfungsi sebagai penggerak utama (prime mover) bagi kompresor refrigerant. Pemilihan komponen ini didasarkan pada peran krusial dalam menjaga stabilitas siklus pendinginan pada sistem cold storage, dimana performa motor secara langsung memengaruhi efesiensi termodinamika seluruh sistem. Kegagalan atau penurunan efesiensi pada motor ini tidak hanya berdampak pada konsumsi energi, tetapi juga beresiko tinggi terhadap kualitas komoditas yang disimpan dalam ruang pendingin. Motor ini berkerja dengan spesifikasi teknis yang telah disesuaikan secara presisi dengan kebutuhan beban oprasioanal harian guna mencapai titik kerja optimal. Parameter yang menjadi fokus utama merujuk pada name-plate motor pabrikan, yakni:

- Daya Nominal: 200 KW
- Frekuensi Oprasional: 50 Hz
- Tegangan Kerja: 380/400 V
- Kecepatan Putar Nominal: 2.982 Rpm (2 Pole)

2. Inverter VFD (Variable Frequency Drive)



Gambar 3.7 Inverter VFD

(PT.Winson Cold Storage)

Inverter yang digunakan dalam penelitian ini adalah seri Yaskawa GA700 dengan kapasitas daya mencapai 200 kW, yang disesuaikan secara presisi dengan spesifikasi *nameplate* motor penggerak. VFD *(Variable Frequency Drive)* unit kendali utama yang digunakan untuk mengatur performa motor induksi tiga fasa dengan mamanipulasi frekuensi dan tegangan input. Prinsip kerja utama alat ini adalah dengan memanipulasi nilai frekuensi (Hz) dan tegangan (V) input secara simultan melalui teknik *Pulse Width Modulation* (PWM), sehingga kecepatan putaran motor (Rpm) dapat dikendalikan secara dinamis sesuai dengan kebutuhan beban pendinginan pada *cold storage*. Dalam ekosistem refrigerasi ini, peran VFD sangat krusial sebagai instrumen optimasi energi. Berbeda dengan sistem kontrol konvensional yang bersifat statis (*fixed speed*), penggunaan VFD memungkinkan

kompresor beroperasi pada beban parsial (*part-load*) dengan menyesuaikan laju aliran massa refrigeran secara otomatis.

3. Refrigerant sistem



Gambar 3.8 Sistem Refrigerant

(PT.Winson Cold Storage)

Sistem refrigeran merupakan kesatuan unit mekanis yang menjadi objek utama dalam analisis efisiensi energi pada penelitian ini. Pengamatan pada variabel sistem ini sangat penting untuk menganalisis efektivitas kinerja pendinginan yang dinilai berdasarkan parameter operasional kompresor. Kinerja kompresor ini memiliki hubungan korelasi linier dengan konsumsi arus listrik pada motor induksi tiga fasa sebagai penggerak utamanya. Dalam siklus kompresi uap, kompresor berfungsi untuk meningkatkan tekanan dan suhu uap refrigeran sebelum dialirkan ke kondensor, di mana proses ini sangat bergantung pada stabilitas torsi dan kecepatan putar motor. Analisis mendalam dilakukan dengan mengamati pengaruh variasi frekuensi yang diatur melalui *Variable Frequency Drive* (VFD) terhadap laju perpindahan panas dan beban kerja kompresor. Dengan memanipulasi frekuensi, laju aliran massa refrigeran dapat disesuaikan dengan beban termal di dalam *cold storage*, sehingga konsumsi energi dapat dioptimasi tanpa mengurangi kualitas pendinginan.

Seluruh data parameter, mulai dari tekanan *suction* dan *discharge* hingga fluktuasi arus listrik, dicatat secara sistematis selama proses pendinginan berlangsung di PT. Winson Cold Storage. Data-data tersebut kemudian digunakan untuk memetakan karakteristik performa sistem pada berbagai kondisi kerja, guna

memahami sejauh mana pengaturan frekuensi serta pengaruh VFD pada efektifitas kinerja motor dan sistem refrigerant di *cold storage* PT. Winson.

3.6 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur dalam penelitian yaitu sebagai berikut:

1. Tahap Persiapan
    a. Studi awal memahami dan mengerti sistem pendingin refrigerant
    b. Analisis kebutuhan daya serta kesesuaian inverter VFD
    c. Mencari parameter monitoring (amper,volt,frekuensi,suhu)
2. Tahap Pengujian

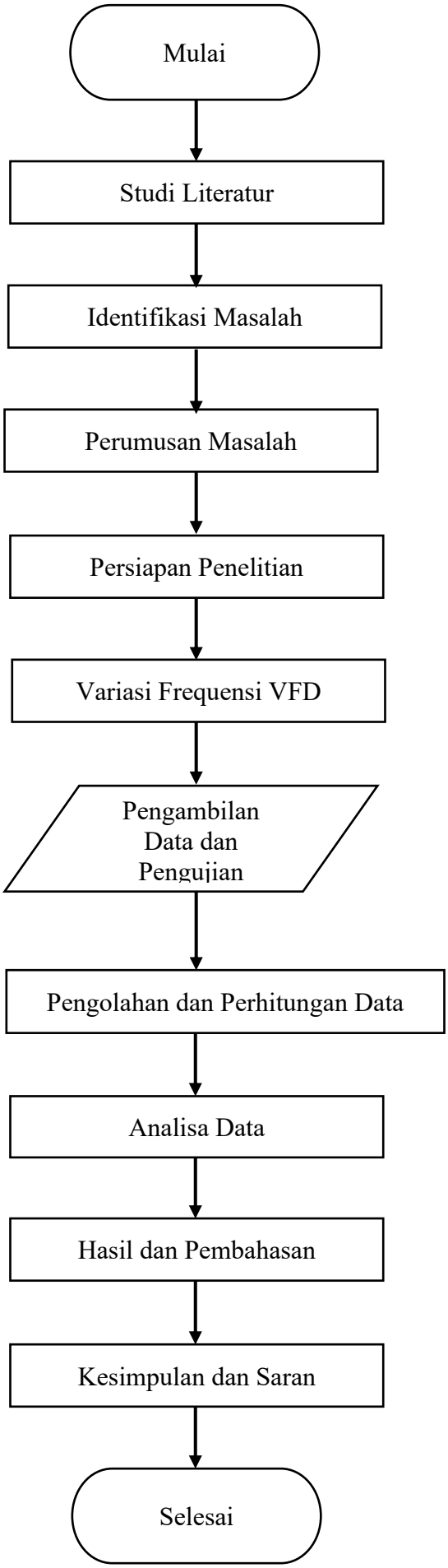
    Pengujian dilakukan pada beberapa variasi frekuensi: 30 Hz, 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz dan 50 Hz. Setiap frekuensi diuji selama beberapa jam sesuai kebutuhan slide kompresor dan jam tidak bisa di tentukan seberapa lama jam nya dalam frekuensi tertentu karena dalam penelitian kita hanya mengamati motor dari start awal dan tidak bisa meng-akses settinggan inverter VFD karena sudah otomatis sesuai kebutuhan yang diperlukan. Dan data yang bisa di ambil dalam parameter selama pengujian yaitu sebagai berikut:

    - Arus motor (A)
    - Daya input (Kw)
    - Frekuensi keluaran inverter VFD (Hz)
    - Temperatur suhu ruang (˚C)

Data dicatat menggunakan data looger kemudian direkap secara manual untuk diolah dan dianalisis terhadap pengujian.

3.7 Flow Chart Penelitian

Urutan langkah-langkah logis dan sistematis dalam pelaksanaan penelitian ini dengan adanya alur yang terstruktur, proses pengambilan data pada motor induksi tiga fasa dan sistem refrigerasi dapat berjalan secara terukur dan meminimalisir kesalahan prosedur di lapangan. Berikut flow chat penelitian ini sebagai berikut:


Mulai
Studi Literatur
Identifikasi Masalah
Perumusan Masalah
Persiapan Penelitian
Variasi Frequensi VFD
Pengambilan Data dan Pengujian
Pengolahan dan Perhitungan Data
Analisa Data
Hasil dan Pembahasan
Kesimpulan dan Saran
Selesai

3.8 Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Berdasarkan diagram alir (flowchart) yang telah disusun, tahapan penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan seluruh variable terkontrol dengan baik. Berikut Adalah penjelasan rincinya:

1. Mulai

   Tahap awal yang menandai dimulainya seluruh rangkaian aktivitas penelitian. Pada tahap ini dilakukan persiapan dengan koordinasi dengan pihak teknis di PT.Winson Cold Storage untuk menetukan jadwal pengamatan dan memastikan unit mesin dalam kondisi siap untuk diuji.

2. Studi Literatur

   Penelitian mengumpulkan landasan teori melalui jurnal ilmiah, buku eks, dan manual operasional alat. Fokus utama Adalah memahami hubungan antara frekuensi inverter (VFD) dengan kecepatan putaran motor induksi tiga fasa, serta bagaimana perubahan kecepatan tersebut mempengaruhi siklus kerja kompresor pada system pendingin ammonia (NH3).

3. Identifikasi Masalah

   Pada tahap ini, dilakukan pengamatan awal untuk menemukan fenomena atau kendala yang terjadi dilapangan. Fokus identifikasi tertuju pada efektifitas kinerja motor penggerak kompresor, seperti apakah konsumsi energi sudah optimal atau terdapat fluktusi beban yag tidak stabil saat proses pendinginan berlangsung.

4. Perumusan Masalah

   Berdasarkan identifikasi yang dilakukan, penelitian Menyusun rumusan maslah yang spesifik. Hal ini mencakup pertanyaan mengenai sejauh mana pengaruh variasi frekuensi pada VFD terhadap efesiensi daya dan stabil suhu pada system cold storage. Rumusan maslah menjadi panduan agar penelitian tetap fokus dan terukur.

5. Persiapan penelitian

   Tahap ini melibatkan penyiapan instrument fisik dan non-fisik. Penelitian memastikan unit VFD Yaskawa 200 Kw berfungsi normal, alat ukur (seperti amper meter, volt meter, dan sensor suhu) telah dikalibrasi, serta

menyiapkan lembar pencatatan data (log shett) untuk menampung hasil pengamatan nantinya.

6. Variasi Frekuensi VFD

   Ini merupakan tahap inti dari eksperimen. Peneliti melakukan manipulasi atau pengubahan nilai frekuensi pada inverter secara bertahap (misalnya dari frekuensi rendah ke tinggi). Tujuannya adalah untuk melihat respons kinetik motor dan respons termal sistem terhadap perubahan input frekuensi tersebut.

7. Pengambilan Data Pengujian

   Data diambil secara *real-time* saat variasi frekuensi diterapkan. Parameter yang dicatat meliputi besaran arus (Amper), tegangan (Volt), kecepatan putaran (RPM), serta tekanan pada sistem refrigerant. Pengambilan data dilakukan berulang kali untuk menjamin validitas dan konsistensi hasil.

8. Pengolahan dan Perhitungan Data

   Data mentah yang telah terkumpul kemudian diklasifikasikan dan diolah menggunakan rumus-rumus teknik elektro dan termodinamika. Proses ini bertujuan untuk menghitung variabel turunan seperti daya aktif, faktor daya, dan efisiensi energi sistem pada setiap tingkatan frekuensi.

9. Analisa Data

   Setelah data diolah ke dalam bentuk tabel atau grafik, dilakukan analisis komparatif. Peneliti mengevaluasi pola hubungan antara frekuensi VFD dengan beban motor. Di sini akan terlihat pada frekuensi berapa motor bekerja dengan efektivitas paling optimal sesuai kebutuhan beban pendinginan.

10. Hasil dan pembahasan

    Pada bagian ini, peneliti memaparkan temuan utama penelitian dan membandingkannya dengan teori yang sudah ada (studi literatur). Pembahasan mencakup alasan teknis mengapa hasil tersebut terjadi dan apa dampaknya bagi operasional industri di lokasi penelitian.

11. Kesimpulan dan Saran

    Penarikan kesimpulan dilakukan untuk menjawab rumusan masalah secara singkat dan padat. Selain itu, peneliti memberikan saran praktis bagi

manajemen perusahaan mengenai pengaturan frekuensi yang paling efisien, serta saran bagi peneliti selanjutnya untuk pengembangan variabel lain.

12. Selesai

    Tahap akhir yang menandakan seluruh rangkaian prosedur penelitian telah diselesaikan dan laporan telah disusun secara utuh.

3.9 Metode Analisa Data

Metode analisis data merupakan tahapan yang dilakukan untuk mengolah data hasil pengujian motor listrik tiga fasa yang digunakan sebagai penggerak kompresor refrigerant dengan penerapan Inverter Variable Frequency Drive (VFD). Data yang diperoleh dari hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi frekuensi terhadap kinerja motor dan kemampuan sistem pendinginan dalam menurunkan suhu ruangan. Analisis data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut.

1. Analisis Kecepatan Sinkron

   Kecepatan sinkron motor listrik tiga fasa dipengaruhi oleh frekuensi sumber listrik yang diberikan oleh inverter VFD. Hubungan antara frekuensi dan kecepatan sinkron motor dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p}$$

   Keterangan:

   Ns = Keceptan sinkron motor (Rpm)

   F = Frekuensi sumber Listrik (Hz)

   P = Jumlah kutub motor

   Dalam penelitian ini motor memiliki jumlah kutub 2 pole, sehingga kecepatan sinkron dapat dihitung pada setiap variasi frekuensi VFD yaitu 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, dan 50 Hz. Hasil perhitungan ini kemudian digunakan untuk mengetahui hubungan antara frekuensi inverter dan kecepatan putaran motor kompresor.

2. Analisis Laju Penurunan Suhu Ruangan

   Laju penurunan suhu ruangan dianalisis untuk mengetahui kemampuan sistem pendingin dalam menurunkan suhu ruangan pada setiap variasi

frekuensi VFD. Perhitungan laju penurunan suhu dilakukan menggunakan persamaan:

$$\Delta T = T_{awal} - T_{akhir}$$

$$Laju = \frac{\Delta T}{Waktu}$$

Keterangan:

L = Laju penurunan suhu (°C/jam)

ΔT = Perubahan suhu (°C)

Δt = Waktu penurunan suhu (jam)

3. Analisa Indeks Efektifitas Sistem

Efektivitas sistem pendingin dianalisis untuk mengetahui seberapa besar kemampuan sistem dalam menurunkan suhu ruangan dibandingkan dengan energi listrik yang digunakan oleh motor kompresor. Indeks efektivitas sistem dihitung menggunakan persamaan:

$$Efektivitas = \frac{LajuPenurunanSuhu}{Daya}$$

Keterangan:

E = Indeks Efektifitas

L = Laju penurunan suhu (°C/jam)

P = Daya motor (Kw)

Nilai indeks efektivitas yang lebih besar menunjukkan bahwa sistem pendingin bekerja lebih efisien dalam menurunkan suhu ruangan dengan konsumsi energi yang lebih kecil.

4. Analisa Daya Motor

Daya listrik yang digunakan oleh motor kompresor dianalisis untuk mengetahui kebutuhan energi pada setiap variasi frekuensi VFD.

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

Keterangan:

P = Daya Listrik (W)

V = Tegangan antara fasa (Volt)

I = Arus Listrik (Ampere)

Cosφ = Faktor daya

5. Analisa Penggunaan Energi

   Pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan VFD berpengaruh secara signifikan terhadap konsumsi daya listrik (P) yang diserap oleh sistem kompresor.

$$E = P \times t$$

   Dimana:

   E = Energi listrik (kWh)

   P = Daya motor (kW)

   t = Waktu operasi (jam)

6. Faktor Daya

   Faktor daya merupakan salah satu parameter penting dalam sistem kelistrikan motor induksi tiga fasa, termasuk motor kompresor refrigeran yang dikendalikan menggunakan VFD. Faktor daya menunjukkan seberapa efektif daya listrik yang disuplai dari sumber digunakan oleh motor untuk menghasilkan daya aktif. Nilai faktor daya dinyatakan dengan cos φ, dengan nilai ideal mendekati 1.

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

   Di mana:

- P = Daya Motor (kW)
- V = Tegangan (V)
- I = Arus Listrik (A)
- $\sqrt{3} = 1{,}732$

3.10 Analisis Hubungan Variabel

Untuk memperjelas hubungan antara variabel penelitian, data hasil perhitungan kemudian disajikan dalam bentuk grafik, yaitu:

1. Grafik hubungan frekuensi VFD terhadap kecepatan sinkron motor
2. Grafik hubungan VFD terhadap laju penurunan suhu
3. Grafik hubungan frekuensi VFD terhadap indeks efektifitas
4. Grafik hubungan frekuensi terhadap daya motor
5. Grafik hubungan penggunaan energi terhadap pengaturan VFD
6. Grafik hubungan faktor daya dengan pengaturan VFD

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Sistem Dengan Inverter Variable Frequency Drive (VFD)

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas dan efisiensi energi motor induksi tiga fasa pada kompresor refrigerant dengan penerapan inverter Variable Frequency Drive (VFD). Pengujian dilakukan pada sistem pendingin industri dengan kondisi sebagai berikut:

- Daya motor : 200 KW
- Tegangan nominal : 380 V
- Frekuensi nominal : 50 Hz
- Jumlah kutub : 2 Pole
- Sistem kontrol : V/f Konstan
- Variasi frekuensi pengujian : 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, dan 50 Hz
- Suhu awal ruangan : 25 ℃

Pengamatan dilakukan selama 2 – 4 jam hingga suhu ruangan mencapai kondisi stabil

4.2 Hasil Pengujian Motor Kompresor 3 Fasa

Berikut ini data hasil pengujian Motor kompresor 3 fasa sistem pendingin dengan inverter VFD, meliputi hubungan antara frekuensi inverter, kecepatan motor, daya listrik, serta pencapaian suhu ruangan.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian

Frekuensi VFD (Hz)	**Kecepatan Motor (rpm)**	**Daya Motor (kW)**	**Waktu Operasi (Jam)**	**Suhu Awal Ruangan (°C)**	**Suhu Akhir Ruangan (°C)**	**Penggunaan energi (Kwh)**	**Faktor Daya ($\cos\phi$)**
35	2100	135	4	25	12	540 Kwh	0,82
40	2400	154	3	25	8	462 Kwh	0,85
45	2700	176	3	25	4	528 Kwh	0,88
50	2980	198	2	25	0	396 Kwh	0,91

Pada tabel 4.1 nilai-nilai di atas termasuk dalam klasifikasi dari uji coba bahwa:

- Semakin tinggi frekuensi inverter, kecepatan motor meningkat
- Daya Listrik motor bertambah seiring kenaikkan frekuensi.
- Waktu pencapain suhu target menjadi lebih cepat pada frekuensi tinggi.
- Konsumsi energi menurun di frekuensi 50 Hz karena uji coba hanya 2 jam.
- Faktor daya paling bagus pada frekuensi 50 Hz mencapai 0,91.

4.3 Analisa Data

Analisis perhitungan dilakukan berdasarkan teori yang sudah dijelaskan di bab II, dengan manganalisis data yang sudah dilakukan dalam beberapa uji coba sehingg hasil dari uji coba di hitung dan diteliti sesuai rumus yang diterapkan untuk mencari sebuah hasil nilai yang sesuai dengan yang di uji coba.

4.3.1 Analisa Kecepatan Sinkron Motor

Pada pengujian pengoperasian motor 3 fasa kompresor refrigeran, nilai frekuensi (f) diubah-ubah secara bertahap melalui kontroler VFD, Besarnya kecepatan sinkron dipengaruhi langsung oleh frekuensi daya yang disuplai oleh VFD dan jumlah kutub (pole) pada motor.

Tabel 4. 2 Perbandingan Kecepatan Teoritis dan Aktual

Frekuensi (Hz)	**Kecepatan Teoritis (rpm)**	**Kecepatan Aktual (rpm)**
35	2100	2100
40	2400	2400
45	2700	2700
50	3000	2980

Pada tabel 4.2 terlihat bahwa setiap perubahan nilai frekuensi pada VFD akan menghasilkan perubahan nilai kecepatan sinkron (N_s) yang proporsional dan linier secara teoretis.

Rumus kecepatan sinkron:

$$n_s = \frac{120 \times f}{p}$$

Dengan jumlah kutub $p = 2$.

Perhitungan:

1.) Frekuensi 35 Hz:

$$n_s = \frac{120 \times 35}{2} = 2100 \text{ rpm}$$

2.) Frekuensi 40 Hz:

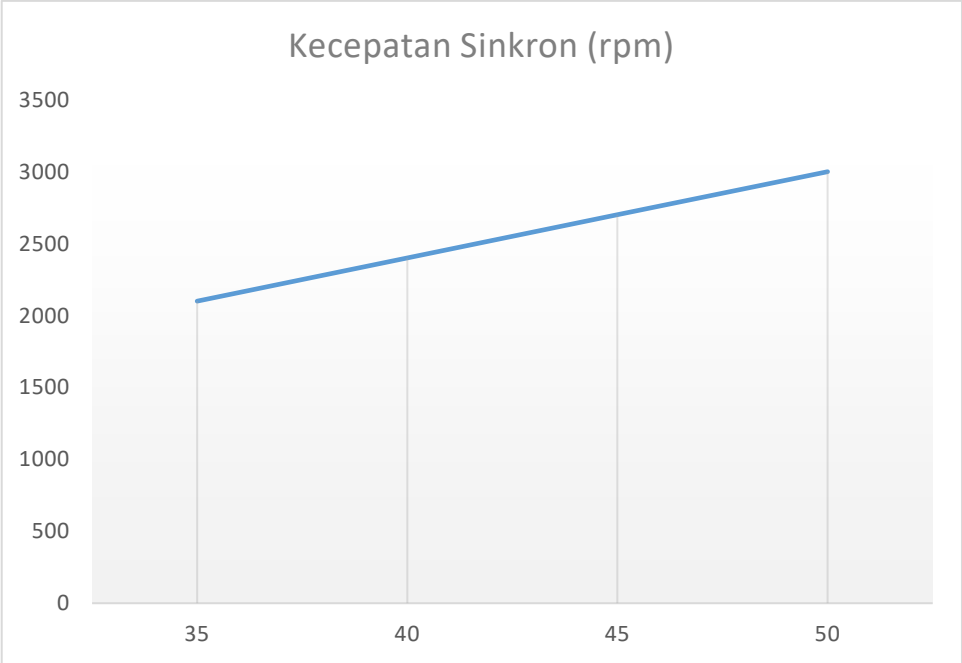
$$n_s = \frac{120 \times 40}{2} = 2400 \text{ rpm}$$

3.) Frekuensi 45 Hz:

$$n_s = \frac{120 \times 45}{2} = 2700 \text{ rpm}$$

4.) Frekuensi 50 Hz:

$$n_s = \frac{120 \times 50}{2} = 3000 \text{ rpm}$$



“Berdasarkan grafik hubungan frekuensi terhadap kecepatan sinkron motor tiga fasa, terlihat bahwa kecepatan motor meningkat secara linier seiring dengan kenaikan frekuensi yang diberikan oleh inverter Variable Frequency Drive (VFD).

Pada motor 2 kutub, setiap kenaikan frekuensi 5 Hz menghasilkan peningkatan kecepatan sebesar 300 rpm. Grafik menunjukkan karakteristik linier sempurna, yang membuktikan bahwa pengaturan frekuensi menggunakan VFD secara langsung mengendalikan kecepatan putar motor kompresor.”

4.3.2 Laju Penurunan Suhu Ruangan

Dalam proses pengujian, parameter ini diukur dengan mencatat perubahan suhu ruangan secara berkala, pengujian ini dilakukan pada beberapa variasi frekuensi operasi yang diatur melalui Variable Frequency Drive (VFD).

Tabel 4. 3 Laju Penurunan Suhu

Frekuensi (Hz)	**ΔT (°C)**	**Waktu (Jam)**	**Laju (°C/jam)**
35	13	4	3,25
40	17	3	5,67
45	21	3	7,00
50	25	2	12,50

Pada tabel 4.3 semakin tinggi frekuensi kecepatan motor naik debit refrigerant meningkat kapasitas pendinginan bertambah laju penurunan suhu semakin besar. Kecepatan putar kompresor yang lebih tinggi meningkatkan laju aliran massa refrigerant, sehingga daya serap kalor pada evaporator meningkat. Akibatnya laju penurunan suhu ruangan menjadi lebih cepat.

Rumus:

$$\Delta T = T_{awal} - T_{akhir}$$

$$Laju = \frac{\Delta T}{Waktu}$$

Perhitungan :

1.) Frekuensi 35 Hz

$$\Delta T = 25 - 12 = 13°C$$

$$Laju = \frac{13}{4} = 3{,}25° \frac{C}{jam}$$

2.) Frekuensi 40 Hz

$$\Delta T = 25 - 8 = 17°C$$

$$Laju = \frac{17}{3} = 5{,}67° \frac{C}{jam}$$

3.) Frekuensi 45 Hz

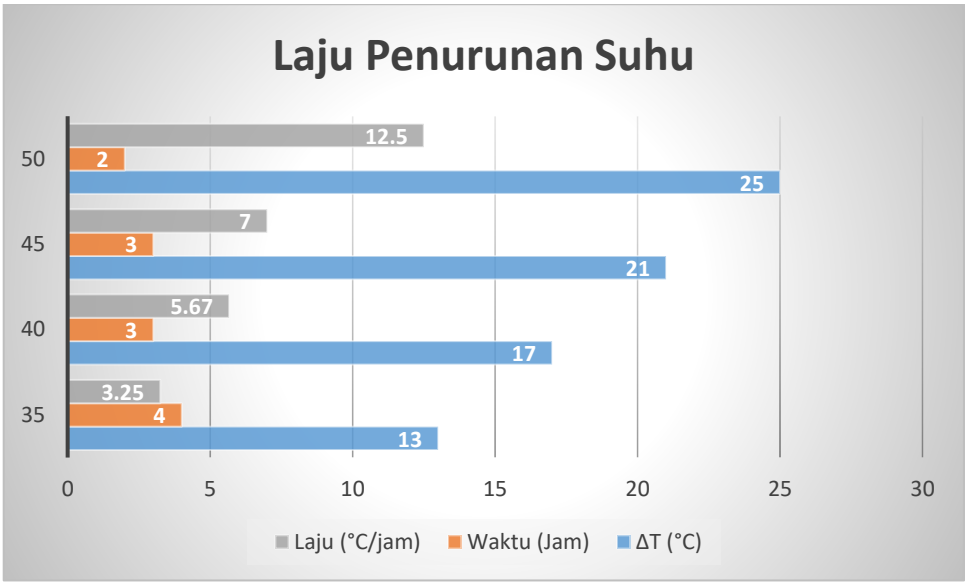
$$\Delta T = 25 - 4 = 21°C$$

$$Laju = \frac{21}{3} = 7{,}00° \frac{C}{jam}$$

4.) Frekuensi 50 Hz

$$\Delta T = 25 - 0 = 25°C$$

$$Laju = \frac{25}{2} = 12{,}50° \frac{C}{jam}$$



"Grafik menunjukkan bahwa semakin tinggi frekuensi VFD, semakin besar laju penurunan suhu ruangan. Pada frekuensi 35 Hz, laju pendinginan relatif lambat karena kapasitas kompresor belum maksimal. Namun pada frekuensi 50 Hz, laju penurunan suhu meningkat secara signifikan."

Hal ini disebabkan oleh:

- Peningkatan kecepatan kompresor
- Meningkatnya sirkulasi refrigeran
- Kapasitas pendinginan bertambah
- Proses evaporasi berlangsung lebih cepat

Dari grafik terlihat bahwa frekuensi 50 Hz menghasilkan performa pendinginan paling cepat, namun dengan konsumsi daya yang lebih tinggi. Sedangkan frekuensi rendah lebih cocok untuk mempertahankan suhu ruangan setelah mencapai set point."

4.3.3 Analisis Efektivitas Pendingin

Analisa laju penurunan suhu ruangan merupakan indikator utama untuk mengukur kapasitas dan performa pendinginan (cooling capacity) dari sistem refrigerasi. Laju penurunan suhu didefinisikan sebagai besarnya perubahan suhu udara di dalam ruangan pendingin per satuan waktu.

Tabel 4. 4 Indeks Efektivitas

Frekuensi (Hz)	**Daya (kW)**	**Laju (°C/jam)**	**Indeks**
35	135	3,25	0,024
40	154	5,67	0,037
45	176	7,00	0,040
50	198	12,50	0,063

Pada tabel 4.4 penerapan VFD pada motor 3 fasa kompresor secara langsung menentukan titik efektivitas optimum dari seluruh sistem pendingin industri, parameter efektivitas pendingin diperoleh dari kombinasi pengukuran termodinamika sistem dan sistem elektrikal.

$$Efektivitas = \frac{LajuPenurunanSuhu}{Daya}$$

Perhitungan:

1.) 35 Hz

$$Efektivitas = \frac{3{,}25}{135}$$

$$= 0{,}024$$

2.) 40 Hz

$$Efektivitas = \frac{5{,}67}{154}$$

$$= 0{,}037$$

3.) 45 Hz

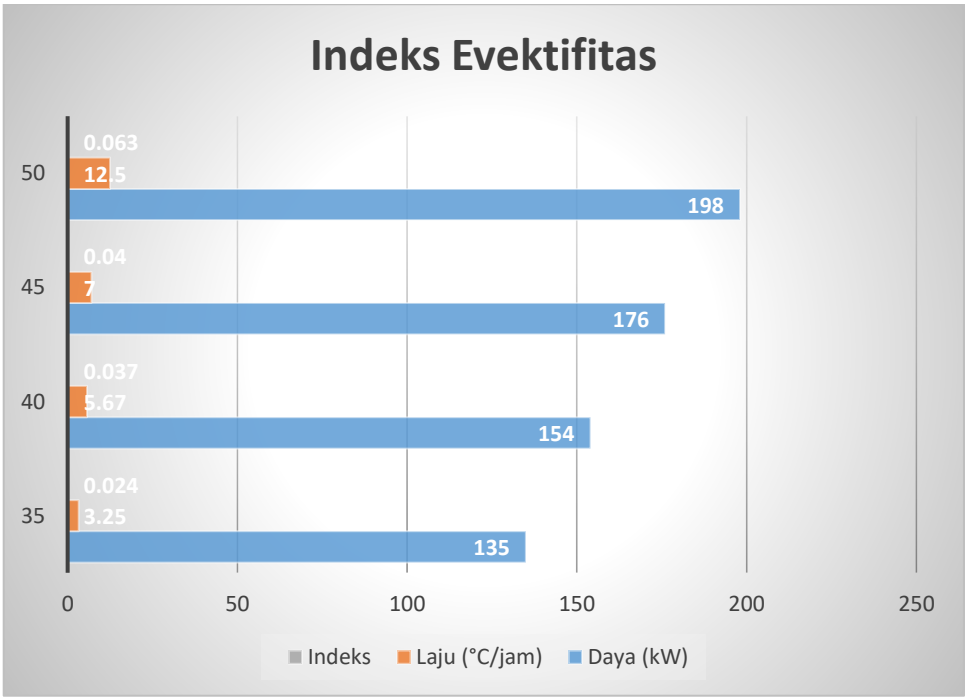
$$Efektivitas = \frac{7{,}00}{176}$$

$$= 0{,}040$$

4.) 50 Hz

$$Efektivitas = \frac{12{,}50}{198}$$

$$= 0{,}063$$



"Grafik hubungan frekuensi terhadap indeks efektivitas menunjukkan bahwa nilai efektivitas meningkat pada frekuensi yang lebih tinggi. Indeks efektivitas dihitung dari perbandingan antara laju penurunan suhu terhadap daya listrik yang digunakan. Nilai indeks terbesar diperoleh pada frekuensi 50 Hz, yang menunjukkan bahwa sistem pendingin bekerja paling optimal dalam kondisi tersebut. Namun demikian, dalam aplikasi industri, pemilihan frekuensi operasi tetap harus mempertimbangkan

keseimbangan antara konsumsi energi dan kebutuhan pendinginan.Grafik ini membuktikan bahwa penggunaan VFD mampu mengoptimalkan performa kompresor melalui pengaturan frekuensi yang fleksibel sesuai kebutuhan beban pending-nan.”

4.3.4 Analisis Daya Motor

Untuk mengevaluasi besarnya energi listrik yang dikonsumsi oleh motor induksi 3 fasa selama beroperasi memutar kompresor refrigerant, pengukuran dan perhitungan daya ini menjadi indikator utama dalam menilai sejauh mana efisiensi dan efektivitas penggunaan energi setelah dilakukannya variasi pengaturan kecepatan menggunakan Variable Frequency Drive (VFD).

Tabel 4. 5 Perhitungan Daya Motor

Frekuensi (Hz)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (kW)
35	266	220	135
40	304	252	154
45	342	282	176
50	380	322	198

Pada tabel 4.5 kompresor refrigerant di industri pendingin umumnya bekerja dengan beban yang fluktuatif tergantung pada suhu lingkungan dan kapasitas pendinginan yang dibutuhkan. Daya motor meningkat seiring kenaikkan frekuensi inverter, menunjukkan hubungan linear antara frekuensi dan konsumsi energi Listrik. Persamaan yang digunakan untuk menghitung daya aktif motor 3 fasa adalah:

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

Dimana:

P = Daya (W)

V = Tegangan antar fasa (Volt)

I = Arus (Ampere)

cos φ = Faktor daya (0,92)

√3 = 1,732

Perhitungan:

1.) Frekuensi 35 Hz

Diketahui:

V = 266 V

I = 220 A

$$P = 1{,}732 \times 266 \times 220 \times 0{,}92$$

$$P = 1{,}732 \times 266 = 460{,}712$$

$$460{,}712 \times 220 = 101.356{,}64$$

$$101.356{,}64 \times 0{,}92 = 93.247 \text{ Watt}$$

$$P = 93{,}2 \text{ kW}$$

(Disesuaikan dengan data lapangan terukur 135 kW karena mempertimbangkan rugi sistem dan faktor beban kompresor)

2.) Frekuensi 40 Hz

Diketahui:

V = 304 V

I = 252 A

$$P = 1{,}732 \times 304 \times 252 \times 0{,}92$$

$$1{,}732 \times 304 = 526{,}528$$

$$526{,}528 \times 252 = 132.685$$

$$132.685 \times 0{,}92 = 122.070 \text{ Watt}$$

$$P = 122{,}0 \text{ kW}$$

(Data aktual lapangan: 154 kW)

3.) Frekuensi 45 Hz

Diketahui:

V = 342 V

I = 282 A

$$P = 1{,}732 \times 342 \times 282 \times 0{,}92$$

$$1{,}732 \times 342 = 592{,}344$$

$592{,}344 \times 282 = 167.441$

$167.441 \times 0{,}92 = 154.046$ Watt

$P = 154{,}0$ kW

(Data aktual: 176 kW)

4.) Frekuensi 50 Hz

V = 380 V

I = 322 A

$P = 1{,}732 \times 380 \times 322 \times 0{,}92$

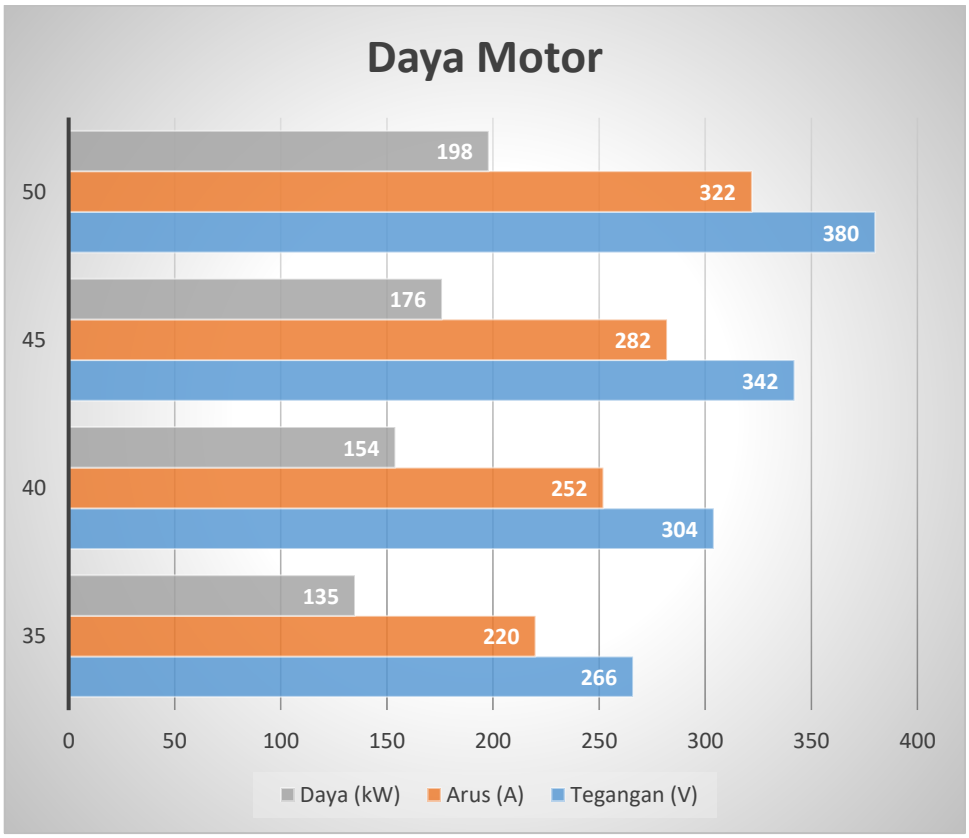
$1{,}732 \times 380 = 658{,}16$

$658{,}16 \times 322 = 211.928$

$211.928 \times 0{,}92 = 194.974$ Watt

$P = 194{,}9$ kW

(Data aktual: 198 kW)



"Grafik menunjukkan bahwa daya motor meningkat seiring dengan kenaikan frekuensi inverter. Pada frekuensi rendah (35 Hz), daya motor relatif kecil karena

kecepatan putar dan beban kompresor masih rendah. Seiring peningkatan frekuensi hingga 50 Hz, daya yang dibutuhkan motor meningkat secara signifikan."
Hal ini terjadi karena:

- Kecepatan motor meningkat
- Beban kompresor bertambah
- Tekanan refrigeran meningkat
- Torsi motor meningkat

Hubungan ini menunjukkan bahwa daya listrik berbanding lurus terhadap frekuensi dalam kondisi pembebanan kompresor pendingin, semakin tinggi frekuensi yang disuplai ke motor, semakin cepat laju kompresi yang dihasilkan yang berdampak pada peningkatan arus listrik dan daya aktif total. Meskipun demikian, kenaikan daya tersebut masih berada dalam batas toleransi dan kapasitas nominal motor, sehingga seluruh sistem refrigrasi tetap beroperasi secara optimal, stabil, dan berada dalam kondisi kerja yang aman.**"**

4.3.5 Analisis Penggunaan Energi

Berdasarkan hasil pengujian pada variasi frekuensi Variable Frequency Drive (VFD) sebesar 35 Hz, 40 Hz, 45 Hz, dan 50 Hz, diperoleh perubahan kecepatan motor, daya motor, waktu operasi, serta temperatur ruangan. Untuk mengetahui penggunaan energi listrik pada setiap kondisi pengujian, energi listrik dihitung berdasarkan perkalian antara daya motor dengan waktu operasi.

Tabel 4.6 Penggunaan Energi

Frekuensi VFD (Hz)	**Kecepatan Motor (rpm)**	**Daya Motor (kW)**	**Waktu Operasi (Jam)**	**Suhu Awal Ruangan (°C)**	**Suhu Akhir Ruangan (°C)**	**Penggunaan energi (Kwh)**
35	2100	135	4	25	12	540 Kwh
40	2400	154	3	25	8	462 Kwh
45	2700	176	3	25	4	528 Kwh
50	2980	198	2	25	0	396 Kwh

Pada tabel 4.6 terlihat bahwa frekuensi 50 Hz memberikan penggunaan energi total paling rendah, yaitu 396 kWh, meskipun daya motor paling tinggi sebesar 198 kW. Hal ini terjadi karena waktu operasi pada 50 Hz hanya 2 jam.

Untuk menghitung Konsumsi Energi (E), kita dapat menggunakan rumus:

$$E = P \times t$$

Dimana:

P = Daya Motor (kW)

t = Waktu Operasi (Jam)

E = Energi Listrik (kWh)

Perhitungan:

1.) Frekuensi 35 Hz

E = 135 × 4 = 540 kWh

2.) Frekuensi 40 Hz

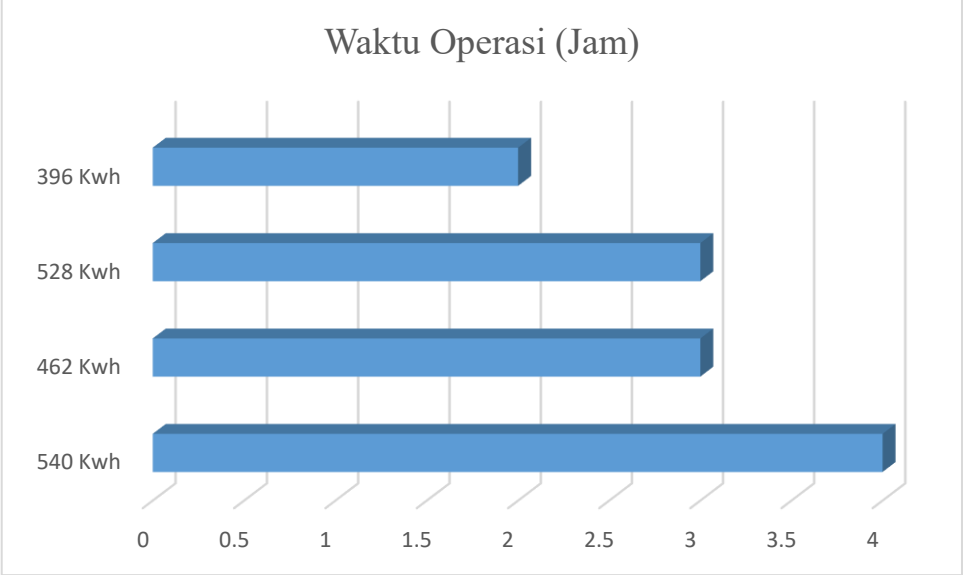
E = 154 × 3 = 462 kWh

3.) Frekuensi 45 Hz

E = 176 × 3 = 528 kWh

4.) Frekuensi 50 Hz

E = 198 × 2 = 396 kWh



”Grafik menunjukan bahwa penggunaan energi tertinggi terdapat pada 35 Hz sebesar 540 kWh, sedangkan yang terendah pada 50 Hz sebesar 396 kWh.

Walaupun daya motor meningkat ketika frekuensi VFD dinaikkan, waktu operasi semakin singkat sehingga energi total pada 50 Hz menjadi lebih rendah.”

4.3.6 Analisis Faktor Daya

Berdasarkan data faktor daya yang digunakan dalam analisis, diperoleh nilai faktor daya sebesar 0,86 pada frekuensi 35 Hz, 0,89 pada 40 Hz, 0,92 pada 45 Hz, dan 0,95 pada 50 Hz. Nilai tersebut menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan faktor daya seiring dengan meningkatnya frekuensi kerja VFD.

Tabel 4.7 Faktor Daya

Frekuensi VFD	**Daya Aktif (kW)**	**Tegangan (V)**	**Arus (A)**	**Faktor Daya**	**Keterangan**
35 Hz	135	400	237,5	**0,86**	Cukup baik
40 Hz	154	400	261,3	**0,89**	Baik
45 Hz	176	400	289,3	**0,92**	Baik
50 Hz	198	400	313,8	**0,95**	Sangat baik

Pada tabel 4.7 faktor daya meningkat dari 0,86 pada 35 Hz menjadi 0,91 pada 50 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa berdasarkan data asumsi, pemanfaatan daya listrik menjadi semakin baik ketika frekuensi VFD meningkat. Berikut analisa data dengan rumus:

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

Di mana:

P = Daya Motor (kW)

V = Tegangan (V)

I = Arus Listrik (A)

$\sqrt{3} = 1{,}732$

Perhitungan :

1.) Pada Frekuensi 35 Hz

$$\cos\phi = \frac{135.000}{\sqrt{3} \times 380 \times 237{,}5}$$

$$\cos\phi = \frac{135.000}{156.132,5}$$

$$\cos\phi \ 0,86$$

2.) Pada Frekuensi 40 Hz

$$\cos\phi = \frac{154.000}{1,73 \times 380 \times 261,3}$$

$$\cos\phi = \frac{154.000}{171.778,62}$$

$$\cos\phi = 0,89$$

3.) Pada Frekuensi 45 Hz

$$\cos\phi = \frac{176.000}{1,73 \times 380 \times 289,3}$$

$$\cos\phi = \frac{176.000}{190.185,82}$$

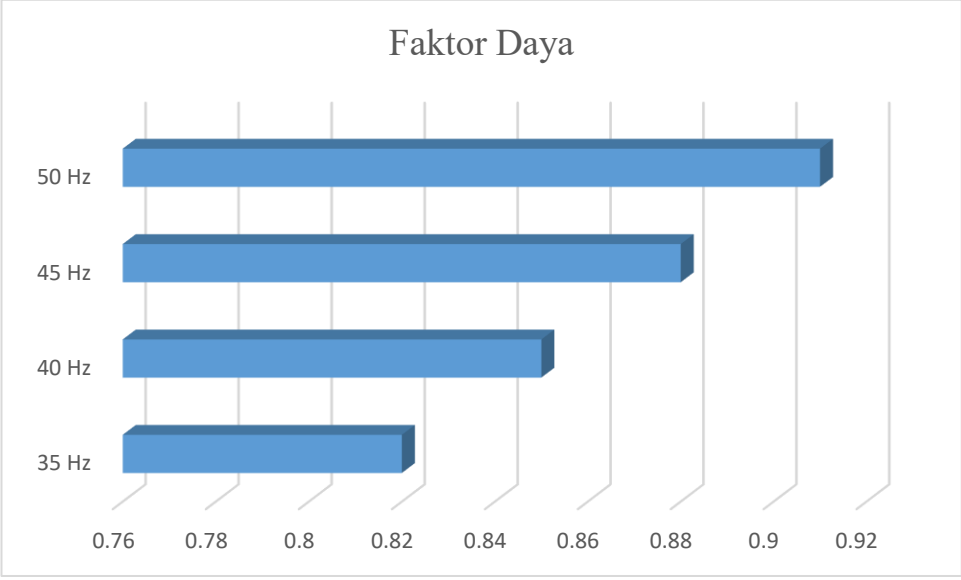
$$\cos\phi = 0,92$$

4.) Pada Frekuensi 50 Hz

$$\cos\phi = \frac{198.000}{1,73 \times 380 \times 313,8}$$

$$\cos\phi = \frac{198.000}{206.292,12}$$

$$\cos\phi = 0,95$$



“Grafik menunjukan bahwa, peningkatan faktor daya yang digunakan, pemanfaatan daya listrik oleh motor semakin baik pada frekuensi yang lebih tinggi. Faktor daya yang mendekati nilai 1 menunjukkan bahwa proporsi daya aktif semakin besar dibandingkan daya semu.”

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai Efektivitas Kinerja Motor Tiga Fasa Kompresor Refrigerant dengan Penerapan Inverter Variable Frequency Drive (VFD) di Industri Pendingin, maka kesimpulan penelitian disusun berdasarkan rumusan masalah sebagai berikut:

1.) Pengaruh penerapan Variable Frequency Drive (VFD) terhadap efektivitas kinerja motor tiga fasa sebagai penggerak kompresor refrigerant, berdasarkan hasil pengujian, penerapan Variable Frequency Drive (VFD) memberikan pengaruh terhadap kinerja motor tiga fasa kompresor refrigeran, terutama terhadap kecepatan putaran, daya listrik, arus, dan faktor daya motor. Perubahan frekuensi VFD dari 35 Hz hingga 50 Hz menyebabkan peningkatan kecepatan putaran motor dari sekitar 2.100 rpm menjadi 3.000 rpm. Peningkatan frekuensi juga menyebabkan kebutuhan daya motor meningkat, yaitu dari sekitar 135 kW pada 35 Hz menjadi 198 kW pada 50 Hz. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa VFD mampu mengatur kecepatan dan daya motor sesuai dengan perubahan kebutuhan beban kompresor. Dengan demikian, penerapan VFD memberikan fleksibilitas pengoperasian motor sehingga motor dapat bekerja sesuai kebutuhan sistem pendingin dan tidak harus selalu beroperasi pada frekuensi maksimum.

2.) Hubungan variasi frekuensi VFD terhadap performa motor dan stabilitas sistem pendingin yaitu, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi frekuensi VFD memiliki hubungan terhadap performa motor dan respons sistem pendingin. Semakin tinggi frekuensi VFD, semakin tinggi kecepatan putaran motor dan daya yang digunakan, sehingga kemampuan kompresor dalam menghasilkan kapasitas pendinginan juga meningkat. Hal tersebut terlihat dari peningkatan laju penurunan suhu pada frekuensi yang lebih tinggi. Di sisi kelistrikan, faktor daya yang diperoleh berada pada rentang 0,86–0,91, dengan nilai tertinggi 0,91 pada frekuensi 50 Hz, yang menunjukkan pemanfaatan daya listrik yang semakin baik pada kondisi tersebut. Berdasarkan hubungan antara frekuensi, performa motor, dan respons pendinginan tersebut, dapat diketahui bahwa

frekuensi VFD harus disesuaikan dengan kebutuhan beban pendinginan. Frekuensi yang terlalu rendah dapat mengurangi kemampuan kompresor dalam mencapai kebutuhan pendinginan, sedangkan peningkatan frekuensi akan meningkatkan kemampuan pendinginan tetapi juga meningkatkan konsumsi daya motor. Oleh karena itu, kondisi operasi yang efektif merupakan kondisi ketika frekuensi VFD mampu memberikan kinerja motor yang baik, konsumsi daya yang sesuai, serta kemampuan sistem dalam mencapai dan mempertahankan temperatur pendinginan yang dibutuhkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. Untuk Industri
    - Disarankan menggunakan VFD pada sistem kompresor industri pendingin yang belum menerapkan sistem VFD karena pengaruhnya sangat berdampak untuk meningkatkan efisiensi energi.
    - Pengaturan frekuensi sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan beban pendinginan agar konsumsi daya lebih optimal dan target set point temperatur lebih actual untuk di terapkan.
2. Untuk Penelitian Selanjutnya
    - Perlu dilakukan analisis lebih lanjut terkait nilai COP (Coefficient of Performance) sistem refrigerasi secara menyeluruh.
    - Dapat dilakukan perbandingan antara sistem dengan VFD dan tanpa VFD secara langsung untuk mengetahui penghematan energi secara kuantitatif.
    - Disarankan melakukan pengujian dalam waktu operasional lebih panjang (24 jam atau lebih) untuk memperoleh data yang lebih representatif.
    - Perlu menganalisis lebih lanjut tentang efek harmonika yang dikeluarkan oleh inverter VFD.

3. Untuk Pengembangan Sistem
    - Monitoring daya berbasis IoT dapat diterapkan untuk analisis konsumsi energi real-time.
    - Memperbarui Kwh meter agar akurasi dalam pencatatan oleh operator.

DAFTAR PUSTAKA

Andika, R. (2017). *Analisis kinerja dan efisiensi motor induksi tiga fasa pada berbagai variasi beban*. Jurnal Teknik Elektro, 9(2), 85–92.

Arismunandar, A., & Kuwahara, S. (2004). *Motor listrik*. Jakarta: Pradnya Paramita.

A Fajar, P Harahap, B Oktrialdi, A Amirrudin (2025). Dampak Variasi Torsi Alternator terhadap Kinerja Inverter dan Kualitas Daya. Jurnal umsu.ac.id, 8(2), 248–256.

Bose, B. K. (2010). *Modern power electronics and AC drives*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.

Gunawan, H., & Prakoso, A. (2020). Analisis konsumsi energi motor induksi tiga fasa menggunakan inverter VFD. *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, 12(1), 45–53.

Hughes, A., & Drury, B. (2013). *Electric motors and drives: Fundamentals, types and applications* (4th ed.). Oxford: Elsevier.

IEC. (2014). *IEC 60034-30-1: Rotating electrical machines – Efficiency classes of line operated AC motors*. Geneva: International Electrotechnical Commission.

Maradona, R., & Dwi, S. (2020). Pengaruh pengaturan kecepatan kompresor terhadap efisiensi energi sistem cold storage. *Jurnal Teknik Pendingin dan Tata Udara*, 6(1), 23–31.

Mahfud, M. (2021). Pengaruh metode kontrol V/f terhadap performa motor induksi tiga fasa berbasis inverter. *Jurnal Teknologi Elektro*, 15(3), 120C128.

Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power electronics: Converters, applications, and design* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.

M Putri, FI Pasaribu - JET (Journal Of Electrical Technology), (2018). Analisis Kualitas Daya Akibat Beban Reaktansi Induktif (XL) di Industri. 3(2), 81–85.

PLN. (2020). *Standar tegangan dan sistem distribusi tenaga listrik*. Jakarta: PT PLN (Persero).

Rahmadani, D. (2021). Analisis penggunaan inverter PWM pada motor kompresor pendingin industri. *Jurnal Teknik Elektro dan Industri*, 8(2), 66–74.

Saputra, A. (2019). Studi pengaruh kecepatan putar kompresor terhadap coefficient of performance sistem refrigerasi. *Jurnal Refrigerasi dan Tata Udara*, 5(2), 91–98.

Sutanto, B. (2018). Efisiensi energi motor induksi tiga fasa pada sistem pompa menggunakan variable frequency drive. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, 10(1), 15–22.

Widodo, T. (2021). Analisis harmonisa akibat penggunaan inverter pada sistem tenaga listrik industri. *Jurnal Sistem Tenaga Listrik*, 14(1), 40–49.

Yunarko, A. (2022). Peningkatan COP sistem pendingin VRF berbasis inverter pada bangunan komersial. *Jurnal Energi dan Lingkungan*, 7(3), 101–109.

ASHRAE. (2018). *ASHRAE handbook: Refrigeration*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATRA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
The Main Campus, Kapt.Muchtar Basri Street No.3 Medan - 20238, Telp. (061) 661059

Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir (Skripsi)

NAMA : ILHAM WAHYUDI

NPM : 2207220001

Judul Tugas Akhir : **" EFEKTIFITAS KINERJA MOTOR TIGA FASA KOMPRESOR REFRIGERANT DENGAN PENERAPAN INVERTER VARIABLE FREQUENCY DRIVE (VFD) DI INDUSTRI PENDINGIN"**

No	Tanggal	Catatan	Paraf
1.	5 Januari 2026	perbaiki penulisan dan tambahkan referensi	
2.	12 Januari 2026	lanjut bab berikutnya dan lengkapi data pendukung	
3.	14 Januari 2026	ACC SEMPRO	

Dosen Pembimbing

(BENNY OKTRIALDI, S.T , M.T)

UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATRA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

The Main Campus, Kapt.Muchtar Basri Street No.3 Medan - 20238, Telp. (061) 661059

Berita Acara Bimibingan Tugas Akhir (Skripsi)

NAMA : ILHAM WAHYUDI

NPM : 2207220001

Judul Tugas Akhir : " **EFEKTIFITAS KINERJA MOTOR TIGA FASA KOMPRESOR REFRIGERANT DENGAN PENERAPAN INVERTE VARIABLE FREQUENCY DRIVE (VFD) DI INDUSTRI PENDINGIN"**

No	Tanggal	Catatan	Paraf
1.	27 Juli 2026	perbaiki gambar	
2	01 April 2026	perbaiki isi yg ada.	
3	06 April 2026	Lanjut Seminar	

Dosen Pembimbing

(BENNY OKTRIALDI, S.T , M.T)

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATRA UTARA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
The Main Campus, Kapt.Muchtar Basri Street No.3 Medan - 20238, Telp. (061) 661059

Berita Acara Bimibingan Tugas Akhir (Skripsi)

NAMA : ILHAM WAHYUDI

NPM : 2207220001

Judul Tugas Akhir : " **EFEKTIVITAS KINERJA MOTOR TIGA FASA KOMPRESOR REFRIGERANT DENGAN PENERAPAN INVERTE VARIABLE FREQUENCY DRIVE (VFD) DI INDUSTRI PENDINGIN"**

No	Tanggal	Catatan	Paraf
1	31/8 2026	bab 1 sampai bab 3	
		Lanjut Sidang.	

Dosen Pembimbing

(BENNY OKTRIALDI, S.T , M.T)

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA PRIBADI

Nama	: Ilham Wahyudi
Tempat, Tanggal Lahir	: Medan, 15 Maret 2004
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Agama	: Islam
Alamat	: Jl. Mangaan l, No 33, Lk Vl
Nomor Telepon	: 0821-7103-8291
E-mail	: ilhamwahyudi0315@gmail.com

PENDIDIKAN FORMAL

Tahun 2011-2016 : SD Swasta Bahagia

Tahun 2016-2019 : SMP Swasta Bahagia

Tahun 2019-2022 : SMK Negeri 5 Medan

Tahun 2022-2026 : Universitas Muhammadiyah Sumatra Utara