

Variable Frequency Drive (VFD) Berbasis Arduino Mega 2560 Sebagai Pengendali Motor Induksi 3 Fase

Deni Irawan¹, Prihadi Murdiyat², Rusdiansyah³
^{1,2,3} Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Samarinda
 pmurdiyat@polnes.ac.id

Abstrak, Penggunaan motor induksi tiga fase di industri sudah sangat umum karena motor induksi tiga fase memiliki kelebihan seperti konstruksinya sederhana dan murah. Sesuai dengan perkembangan penggunaannya, motor induksi 3 fase diharapkan dapat diatur kecepatan putarnya. Kini, pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa dapat dilakukan oleh perangkat variabel frequency drive (VFD) dengan mengatur frekuensi keluaran VFD. Pada penelitian ini dilakukan rancang bangun VFD berbasis Arduino Mega 2560 yang menggunakan metode penyaklaran SPWM untuk membentuk gelombang sinusoida yang merupakan suplai untuk motor induksi. Frekuensi yang dihasilkan pada VFD dapat diatur dari 0 Hz sampai dengan 50 Hz. Hasil dari pengujian VFD dengan beban motor induksi 3 fase diperoleh bahwa kecepatan motor dapat diatur dari 278 rpm sampai dengan 1454 rpm dengan memvariasikan frekuensi dari 10 Hz sampai dengan 50 Hz.

Kata kunci: *Variable Frequency Drive, SPWM, Motor Induksi 3 Fase,*

I. PENDAHULUAN

Pada zaman sekarang, penggunaan motor induksi tiga fase di industri sudah semakin banyak. Hal ini karena motor induksi tiga fase mempunyai beberapa kelebihan yaitu handal, mempunyai tenaga yang besar, konsumsi daya listrik yang rendah serta perawatannya yang mudah.

Seringkali motor induksi diinginkan untuk berputar pada kecepatan yang diperlukan. Salah satu caranya adalah dengan menggunakan rangkaian TRIAC (*Triode for Alternating Current*) yang diatur sudut triggernya. Tetapi cara ini menghasilkan bentuk gelombang sinusoida terpotong yang kurang ideal sebagai tegangan masukan motor. Cara lain adalah dengan mengatur frekuensi sumber tegangannya akan tetapi karena sumber tegangan yang tersedia umumnya memiliki frekuensi yang konstan atau tidak bisa diubah nilainya, maka diperlukan sebuah alat yg mampu mengubah tegangan sumber dengan frekuensi tetap (umumnya 50 Hz) menjadi sumber tegangan dengan frekuensi variabel. Alat tersebut bernama *Variable Frequency Drive* (VFD).

VFD merupakan sebuah alat yang terdiri *rectifier*, *filter*, *inverter*, dan rangkaian kontrol yang digunakan untuk mengatur frekuensi tegangan keluaran yang diinginkan. Sistem

kontrol kecepatan motor induksi dengan menggunakan VFD sama dengan sistem kontrol motor induksi dengan menggunakan inverter, hal ini dikarenakan tegangan keluaran dari VFD merupakan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dibangkitkan oleh inverter di dalam VFD. Keuntungan operasi *inverter* PWM sebagai teknik konversi dibanding jenis-jenis inverter lainnya ialah rendahnya distorsi harmonik pada tegangan keluaran dibanding menggunakan jenis inverter lainnya [1]. Selain itu teknik PWM sangat mudah dan hemat untuk diterapkan berkat semakin pesatnya perkembangan semikonduktor (terutama komponen daya yang mempunyai waktu penyaklaran sangat cepat).

Untuk pengaturan kecepatan motor induksi, teknik PWM mampu menggerakkan motor induksi dengan putaran halus dan rentang frekuensi yang lebar.

Pada Skripsi ini, penulis melakukan rancang bangun *Variable Frequency Drive* dengan masukan tegangan 1 fase dan keluaran tegangan 3 fase dengan frekuensi yang dapat diatur dari 0Hz sampai dengan 50Hz. VFD ini dikombinasikan dengan pensaklaran PWM melalui program di arduino. Kontrol sinusoidal PWM pada bagian inverter VFD adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk pengaturan frekuensi dan tegangan keluaran pada VFD. Oleh karena itu, sesuai dengan latar belakang diatas, penulis memberi judul “Rancang Bangun Variable Frequency Drive (VFD) Sebagai Pengendali Motor Induksi 3 Fase Berbasis Arduino Mega 2560”

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Variable Frequency Drive (VFD)

Variable Frequency Drive (VFD) merupakan gabungan dari *rectifier* dan *inverter*, di mana *rectifier* berfungsi sebagai pengubah tegangan AC dengan frekuensi tetap menjadi tegangan DC dan *inverter* berfungsi sebagai pengubah tegangan DC menjadi AC dengan frekuensi variabel yang dapat diatur. VFD melakukan konversi dari tegangan AC frekuensi tetap menjadi AC frekuensi variabel dengan cara mengubah menjadi tegangan DC terlebih dahulu melewati *rectifier* kemudian menjadikannya variabel frekuensi melalui *inverter*.

VFD berfungsi untuk mengatur kecepatan motor induksi 3 fase dengan cara mengubah frekuensi yang masuk ke motor induksi tersebut seperti pada Persamaan (1).

$$n = (120 \cdot f) / p \quad (1)$$

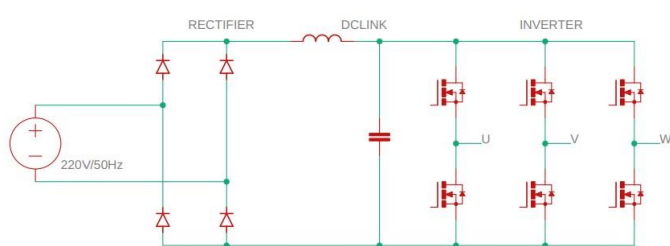
keterangan: n = Putaran per menit (rpm)

f = Frekuensi (Hz) p =

Jumlah kutub

Fungsi utama dari VFD ada dua yaitu, untuk melakukan konversi listrik, dan untuk mengatur frekuensi yang keluar. Pengaplikasian VFD dimulai dari peralatan kecil sampai dengan peralatan besar seperti, kompresor, sistem ventilasi pada bangunan besar, pompa, konveyor, dan alat pengendali mesin lainnya. Kelebihan dari penggunaan VFD pada motor adalah dapat menghemat energi listrik sehingga dapat mengurangi biaya konsumsi listrik [1].

Rangkaian dari VFD adalah terdiri dari *rectifier* (penyearah), *DC link*, dan *inverter* seperti ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian variable frequency drive (VFD)

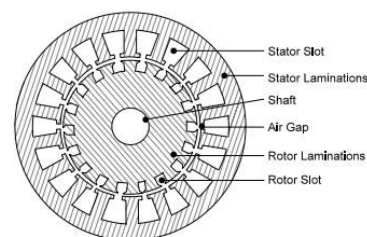
B. Motor Induksi 3 Fase

Untuk aplikasi pada industri dan pertambangan, motor induksi 3 fase adalah penggerak utama untuk sebagian besar mesin. Motor ini dapat dioperasikan baik secara langsung dari sumber listrik atau dari konverter frekuensi. Di negara-negara industri modern, lebih dari setengah total energi listrik yang digunakan di negara-negara tersebut diubah menjadi energi mekanik melalui motor induksi AC. Aplikasi untuk motor ini meliputi hampir setiap tahap pembuatan dan pemrosesan. Pengaplikasiannya juga meluas ke bangunan komersial dan lingkungan domestik. Biasa digunakan untuk menggerakkan pompa, kipas, kompresor, mixer, agitator, pabrik, konveyor, penghancur, peralatan mesin, derek, dan lain-lain. Tidak heran jika motor listrik jenis ini sangat populer saat ini karena kesederhanaan, keandalan, dan biayanya rendah [2].

1) Konstruksi Motor Induksi 3 Fase

Konstruksi dasar motor induksi AC terdiri dari 2 bagian elektromagnetik [2], yaitu: a. *Stator*

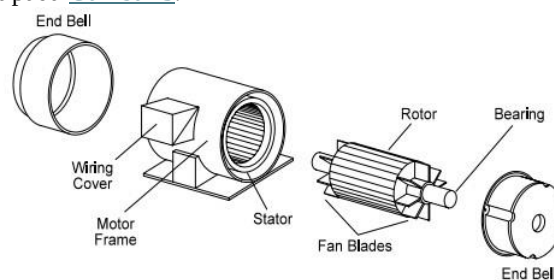
Stator adalah bagian stasioner luar motor yang ditunjukkan pada Gambar 2. Untuk bagian stator terdiri dari: *Stator Slot*, *Stator Lamination*, *Rotor Lamination*, *Shaft* atau Poros, dan *Air Gap* atau Celah Udara.



Gambar 2. Laminasi stator dan rotor [2]

b. Rotor

Ini adalah bagian yang berputar pada motor. Seperti halnya stator di atas, rotor terdiri dari satu set dari laminasi baja berlubang yang disatukan dalam bentuk jalur magnet silinder dan rangkaian listrik. Bagian-bagian dari rotor dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Detail perakitan motor induksi AC [2]

2) Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Fase

Ketika catu daya AC 3 fase dihubungkan ke terminal stator dari motor induksi, arus bolak-balik 3 fase mengalir pada belitan stator. Arus ini mengatur perubahan medan magnet (pola fluks), yang berputar di sekitar bagian dalam stator. Kecepatan putaran sinkron dengan frekuensi daya listrik dan disebut dengan kecepatan sinkron.

Pada jenis motor induksi 3 fase yang paling sederhana, medan putar dihasilkan oleh 3 belitan stator tetap, berjarak 120° terpisah di sekeliling stator yang dapat dilihat pada Gambar 2.6. Ketika tiga belitan stator terhubung ke catu daya 3 fase, fluks melingkupi satu rotasi untuk setiap siklus tegangan suplai. Pada catu daya 50 Hz, fluks stator berputar dengan kecepatan 50 putaran per detik, atau $50 \times 60 = 3000$ putaran per menit [2].

Kecepatan di mana fluks stator berputar disebut kecepatan sinkron dan tergantung pada jumlah kutub motor dan frekuensi catu daya, seperti pada Persamaan (1).

C. Inverter

Inverter didefinisikan sebagai perangkat yang mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Inverter datang dalam berbagai jenis, berbagai harga, daya, efisiensi dan tujuan. Inverter semakin umum digunakan selama beberapa tahun ini karena digunakan dalam pembangkit listrik tenaga surya. Karena tenaga surya menghasilkan tegangan DC, maka diperlukan inverter untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC yang diperlukan untuk menyuplai peralatan rumah tangga [3].

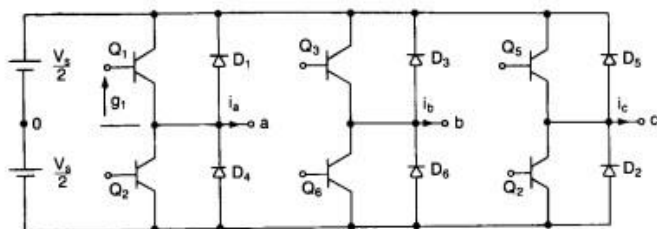
D. Inverter 3 Fase

Pada VFD, inverter 3 fase digunakan untuk mengubah tegangan DC pada DC Link menjadi tegangan AC 3 fase. Gelombang keluaran inverter 3 fase yang dihasilkan tidak sinus murni sehingga dibutuhkan *filter* untuk menghasilkan gelombang sinus murni.

Inverter 3 fase terdiri dari 6 komponen switching berupa MOSFET dan membutuhkan 6 sinyal PWM yang berasal dari mikrokontroler sebagai pengaturan frekuensi seperti yang terlihat pada [Gambar 4](#) [4]. Ketika MOSFET Q1 dalam kondisi aktif, terminal A akan terhubung ke terminal positif pada tegangan masukan DC. Ketika MOSFET Q4 dalam kondisi aktif, terminal A akan terhubung ke terminal negatif pada tegangan masukan DC. Tegangan antar fase yang dihasilkan dari inverter 3 fase dengan mode konduksi 180° dapat dicari dengan Persamaan (2.6) berikut [4]:

$$V_{L-L} = \frac{4V_s \cos 30^\circ}{\sqrt{2}\pi} = 0.7797 V_s \quad (2)$$

keterangan: V_{L-L} = Tegangan line to line (V)
 V_s = Tegangan sumber DC (V)

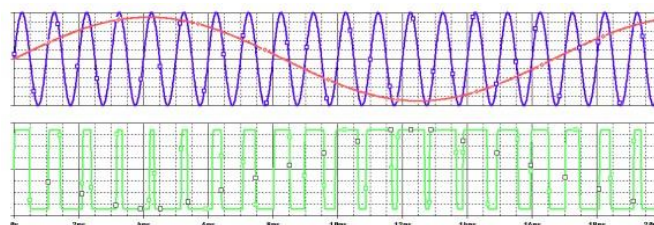


Gambar 4. Rangkaian inverter 3 fase [4]

E. Pulse Width Modulation (PWM)

Metode umum untuk menghasilkan daya AC dalam konverter daya elektronik adalah modulasi lebar pulsa (PWM). PWM digunakan secara luas sebagai sarana untuk menjalankan perangkat AC dengan sumber listrik DC. Sumber tegangan DC dapat dibuat agar terlihat seperti sinyal AC melalui beban dengan mengubah siklus tugas sinyal PWM. Pola di mana siklus tugas Sinyal PWM yang bervariasi dapat dibangkitkan melalui seperti komponen analog sederhana, mikrokontroler, atau sirkuit terintegrasi PWM khusus [3].

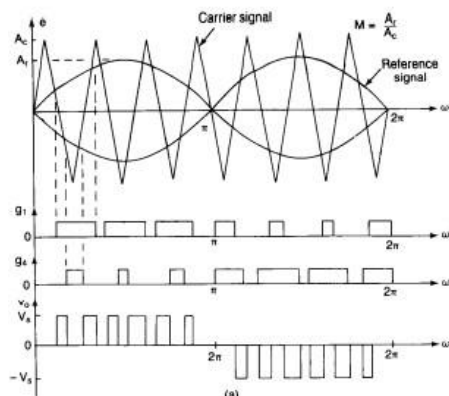
Dalam sirkuit analog, sinyal PWM dihasilkan dengan menggabungkan sinyal *reference* dan sinyal *carrier* melalui komparator yang menciptakan sinyal *output* berdasarkan perbedaan antara kedua masukannya. Sinyal *reference* adalah gelombang sinusoidal pada frekuensi sinyal keluaran yang diinginkan. Sinyal *carrier* adalah gelombang segitiga atau 'gigi gergaji' yang beroperasi pada frekuensi yang lebih besar secara signifikan dibandingkan gelombang *reference*. Ketika sinyal *carrier* melebihi *reference*, output berada pada satu keadaan, dan ketika *reference* melebihi *carrier*, output berada pada keadaan yang berlawanan. Prosesnya ditunjukkan pada [Gambar 5](#), dengan sinyal *carrier* berwarna biru, sinyal *reference* berwarna merah, dan output berwarna hijau [3].



Gambar 5. Level sinyal PWM (kontrol analog) [3]

F. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Sinyal keluaran inverter dapat dikontrol dengan menggunakan teknik PWM dengan cara mengatur periode ON dan OFF dari *switching inverter*. Diantara teknik PWM, metode *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) banyak digunakan karena pengaturan tegangan dan frekuensi keluaran inverter menghasilkan bentuk yang mendekati gelombang sinusoidal. Sinyal pemicu pada *switching inverter* didapatkan dari perbandingan sinyal segitiga yang juga disebut dengan sinyal *carrier* dengan sinyal sinusoidal tiga fase yang juga disebut dengan sinyal *reference*. Sinyal *carrier* memiliki frekuensi jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sinyal *reference*. Perbandingan antara sinyal *reference* dan sinyal *carrier* dapat dilihat pada [Gambar 6](#). Perbandingan antara amplitudo sinyal *reference* dengan sinyal *carrier* dinamakan dengan index modulasi [5].



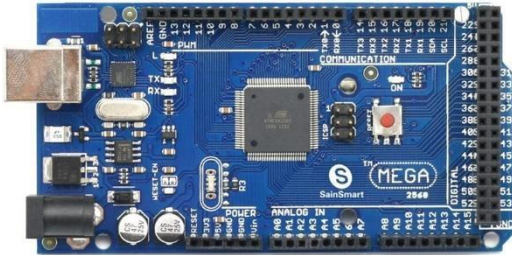
Gambar 6. Pemicuan gelombang SPWM [4]

G. Arduino Mega 2560

Arduino merupakan *board* berbasis mikrokontroler *opensource* yang di dalamnya terdapat komponen utama yaitu sebuah chip mikrokontroler dengan jenis AVR dari perusahaan Atmel. Mikrokontroler itu sendiri ialah chip atau IC (*integrated circuit*) yang mampu menyimpan dan mengerjakan program yang dikirim oleh komputer. Tujuan menanamkan program pada mikrokontroler ialah agar rangkaian elektronik bisa membaca *input* lalu memproses program untuk menghasilkan output sesuai yang diinginkan. Jadi mikrokontroler bertugas menjadi otak yg mengendalikan proses *input*, dan *output* sebuah rangkaian elektronika

Pada penelitian ini digunakan Arduino Mega yang menggunakan chip mikrokontroler Atmega2560. Board ini memiliki pin I/O yang cukup banyak dibanding tipe lainnya seperti uno, nano, mini, yaitu: 54 buah digital I/O pin (14 pin

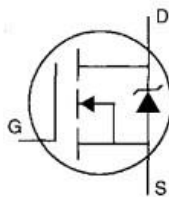
yang diantaranya adalah PWM), 16 pin analog input, 4 pin UART (serial port hardware). Arduino Mega 2560 juga dilengkapi dengan sebuah oscillator 16 Mhz, sebuah *port* USB, *power jack* DC, ICSP *header*, dan tombol *reset*. Board ini sudah sangat lengkap dari tipe lainnya, sudah memiliki segala sesuatu yang dibutuhkan untuk sebuah mikrokontroler. Board Arduino Mega 2560 dapat dilihat pada [Gambar 7 \[6\]](#).



Gambar 7. Arduino Mega 2560 [6]

H. MOSFET (IRFP460)

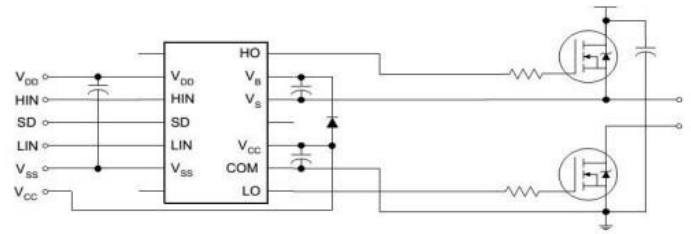
Selain menggunakan mikrokontroler sebagai pemicu sinyal untuk *inverter*, dibutuhkan pula saklar dalam perancangan *inverter*. Sebuah komponen yang berfungsi sebagai saklar pada *inverter* yaitu MOSFET seperti terlihat pada [Gambar 8](#). MOSFET merupakan kependekan dari *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* yang merupakan transistor efek medan berupa perangkat semikonduktor yang mempunyai impedansi masukan tinggi. MOSFET bekerja dengan cara mengaktifkan buka tutup saklar ON dan OFF. MOSFET mempunyai 3 kaki terminal yaitu *source* (S), *gate* (G), dan *drain* (D). Arus listrik masuk melewati gerbang *source* dan kemudian keluar melalui gerbang *drain*. Sedangkan gerbang *gate* berfungsi sebagai pengatur lebar saluran yang dikendalikan oleh tegangan dari elektroda [7].



Gambar 8. MOSFET N-channel [8]

I. Gate Driver MOSFET (1R2110)

IC 1R2110 adalah driver MOSFET dan IGBT yang betegangan dan berkecepatan tinggi dengan dua sisi keluaran *high* dan *low*. *Input* logika kompatibel dengan keluaran CMOS atau LSTTL standar, hingga logika 3.3V. Keluaran dari driver menampilkan tahap penyangga arus pulsa tinggi yang dirancang untuk minimum konduksi silang *driver*. Penundaan propagasi disesuaikan untuk menyederhanakan penggunaan dalam aplikasi frekuensi tinggi. Saluran mengambang dapat digunakan untuk menggerakkan MOSFET daya N-Channel atau IGBT dalam konfigurasi sisi *high* yang beroperasi hingga 500 atau 600 volt [9]. Rangkaian gate driver MOSFET dapat dilihat pada [Gambar 9](#).



Gambar 9. Rangkaian *gate driver* MOSFET [9]

J. Liquid Crystal Display (LCD)

Liquid crystal display (LCD) merupakan salah satu komponen elektronika yang berfungsi untuk menampilkan data, baik karakter, huruf maupun grafik. Jenis LCD yang dipakai pada penelitian ini adalah LCD M1632. LCD ini terdiri dari dua bagian, yang pertama merupakan panel LCD sebagai media penampil informasi dalam bentuk huruf/angka dua baris, masing-masing baris bisa menampung 16 huruf/angka. Bentuk dari LCD ditampilkan pada [Gambar 10 \[10\]](#).



Gambar 10. *Liquid crystal display* (LCD) [10]

K. Sensor PZEM-004T

Sensor PZEM-004T merupakan sebuah modul elektronik yang dapat mengukur arus, tegangan, daya, frekuensi, energi dan. Modul ini sudah dilengkapi dengan sensor tegangan dan sensor arus (CT). Sensor ini menghasilkan *output* dengan komunikasi serial. Jika dihubungkan dengan mikrokontroler seperti arduino maka komunikasi yang digunakan ialah komunikasi serial. Pengkabelan dari modul ini terdiri dari 2 bagian, yaitu pengkabelan untuk masukan tegangan dan arus, serta pengkabelan komunikasi serial. Sesuai *datasheet*, modul sensor PZEM-004T ini memiliki tegangan kerja yaitu bekerja pada 80~260 VAC, tegangan *test* yaitu 80~260 VAC, daya 100 A/22.000 W, dan frekuensi 45~65 Hz [11]. Sensor PZEM-004T dapat dilihat pada [Gambar 11](#).



Gambar 11. Sensor PZEM-004T [11]

L. Filter Pasif

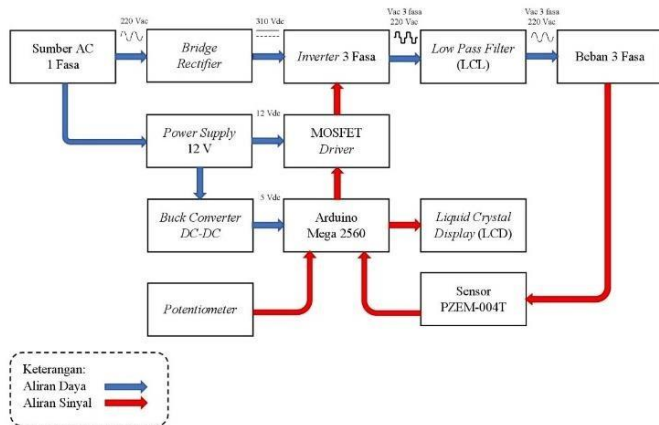
Filter pasif merupakan jenis *filter* yang menggunakan komponen pasif untuk dapat meloloskan frekuensi yang diinginkan. Rangkaian *filter* pasif sendiri terdiri dari komponen pasif yaitu resistor, kapasitor dan induktor. Jenis-jenis *filter*

pasif ditentukan berdasarkan bagaimana mengklasifikasikan spektrum frekuensi yang diinginkan agar dapat lolos dalam filter yang akan dirancang. Jenis- jenis filter pasif yaitu *Low Pass Filter*, *High Pass Filter*, *Band Pass Filter*, dan *Band Stop Filter* [12].

III. METODE PENELITIAN

A. Gambaran Umum Sistem

Perancangan alat ini terdiri dari beberapa blok utama, yaitu blok rangkaian daya yang terdiri dari *full wave bridge rectifier* dan *inverter* tiga fase, untuk blok rangkaian kontrol terdiri dari [Gambar 12](#). Diagram Blok Sistem



Gambar 12. Diagram blok sistem

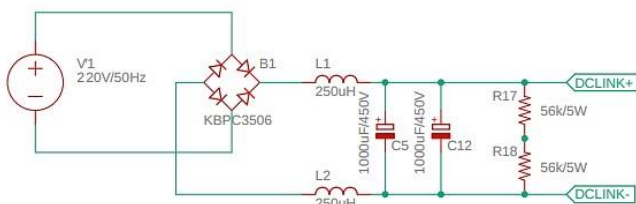
B. Perancangan Hardware

Perancangan *Hardware* pada alat *Variable Frequency Drive* yang dibangun dalam sistem ini antara lain sebagai berikut:

1) Perancangan Bridge Rectifier

Pada rangkaian *Bridge Rectifier* ini menggunakan *Diode Bridge* tipe KBPC3506 dengan tegangan maksimum sebesar 600 V dan arus maksimum sebesar 35 A sehingga cocok digunakan untuk rangkaian VFD. Tegangan sumber *bridge rectifier* ini menggunakan *single phase voltage regulator* sehingga dapat diatur tegangan masukannya.

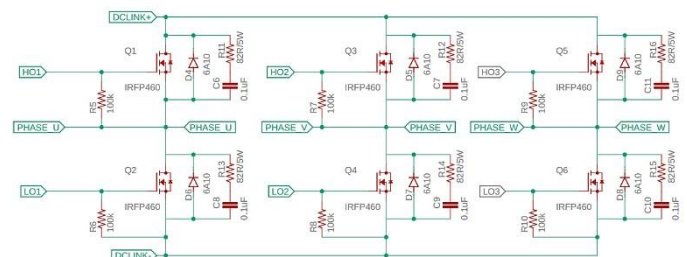
Kapasitor dan induktor ini digunakan supaya hasil dari tegangan DC yang keluar dari *diode bridge* lebih halus, sedangkan resistor digunakan untuk membuang muatan pada kapasitor apabila sistem dalam keadaan berhenti. Rangkaian perancangan *Bridge Rectifier* dapat dilihat pada [Gambar 13](#).



Gambar 13. Rangkaian diode bridge

2) Perancangan Inverter 3 Fase

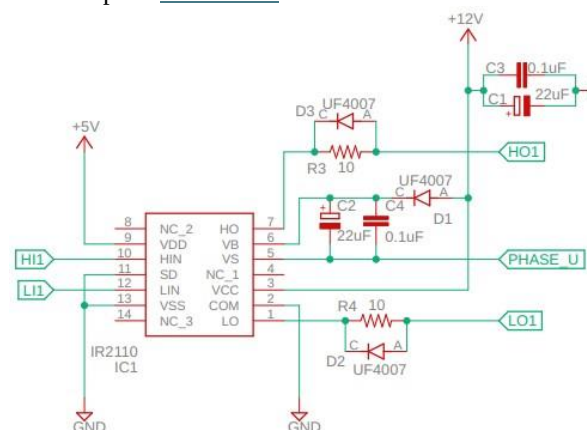
Pada rangkaian *Inverter* 3 fase yang dirancang pada penelitian ini menggunakan 6 buah MOSFET, dimana pada masing-masing fase dilayani oleh 2 MOSFET. MOSFET yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe IRFP460 yang memiliki tegangan *Drain-Source* sebesar 500 V dan arus *Drain* sebesar 20 A. Pada masing-masing MOSFET digunakan pengaman diode yang dipasang parallel dengan MOSFET dan sebuah rangkaian RC *Snubber*. Untuk penyulutan *inverter* 3 fase sendiri terdapat enam masukan pada masing-masing kaki *Gate* MOSFET yaitu HO1, LO1, HO2, LO2, HO3, dan LO3. Rangkaian dari *inverter* 3 fase dapat dilihat pada [Gambar 14](#).



Gambar 14. Inverter 3 fase

3) Perancangan MOSFET Driver

Perancangan MOSFET Driver pada penelitian ini menggunakan 3 buah IC IR2110 pada masing-masing fase. IC IR2110 berfungsi untuk mengatur high atau low sinyal yang akan diterima oleh MOSFET. Input sinyal pada IC IR2110 pada kaki HIN dan LIN, dimana *input* sinyal ini berasal dari *optocoupler* dan mikrokontroler, untuk *output* IC IR2110 terdapat pada kaki HO dan LO yang dihubungkan dengan kaki *Gate* MOSFET *high side* dan MOSFET *low side*. Ketika HIN mendapatkan sinyal *HIGH* maka akan *menggerakkan* MOSFET *high side*, sedangkan ketika LIN mendapatkan sinyal *HIGH* maka akan *menggerakkan* MOSFET *low side*. Komponen *bootstrap* pada rangkaian MOSFET Driver ini mengacu pada *Application Note* AN-978, *datasheet* IC IR2110, dan *datasheet* IRFP460. Rangkaian dari MOSFET Driver dapat dilihat pada [Gambar 15](#).



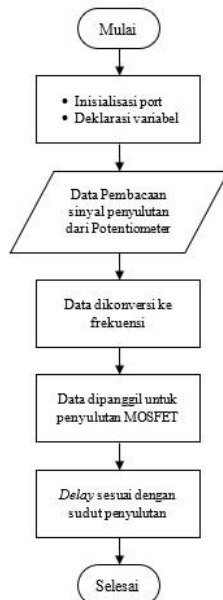
Gambar 15. Rangkaian MOSFET Driver

C. Perancangan Software

Perancangan *software* pada alat *Variable Frequency Drive* antara lain sebagai berikut:

1) Perancangan Program Penyulutan Sinyal SPWM 6 Pulse

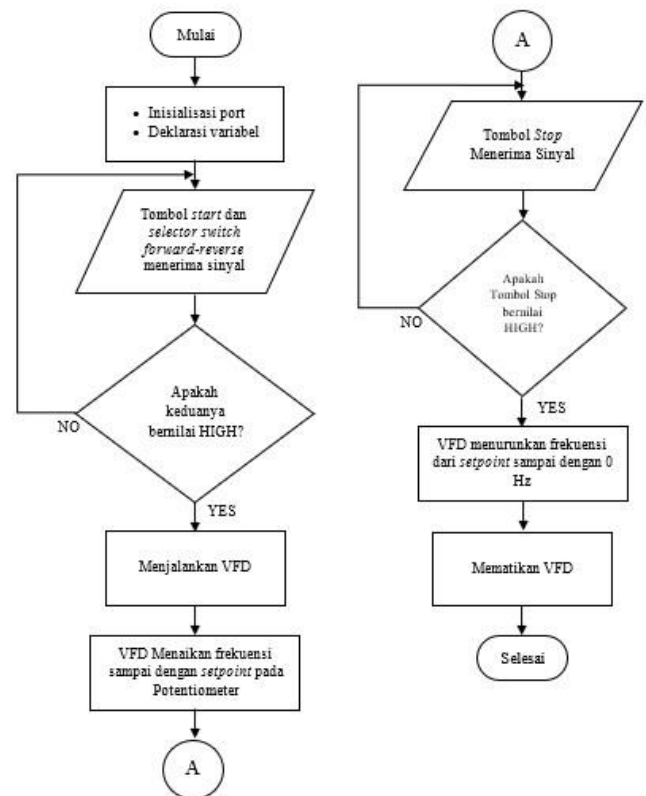
Pembangkitan sinyal SPWM pada penelitian ini menggunakan program pada Arduino Mega 2560. Keluaran dari Arduino akan masuk ke *Optocoupler* lalu dari *Optocoupler* menuju ke *Gate driver* MOSFET IR2110 untuk mengolah sinyal tersebut sebelum masuk ke MOSFET. Untuk *flowchart* penyulutan sinyal SPWM 6 pulse dapat dilihat pada [Gambar 16](#).



Gambar 16. *Flowchart* penyulutan sinyal SPWM 6 pulse

2) Perancangan Program Rangkaian Kontrol VFD

Pengontrolan VFD pada penelitian ini menggunakan program pada Arduino Mega 2560. Pengontrolan yang digunakan berupa *start*, *stop*, dan *switch direction*. Untuk *flowchart* program rangkaian kontrol VFD dapat dilihat pada [Gambar 17](#).



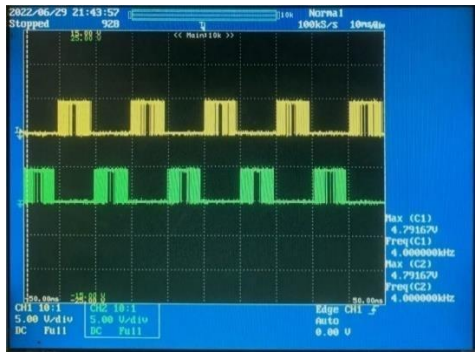
Gambar 17. *Flowchart* program rangkaian kontrol VFD

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Sinyal SPWM

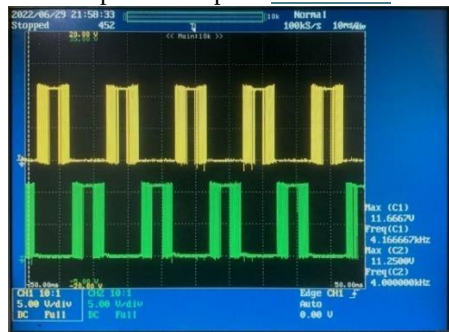
Pengujian sinyal SPWM dilakukan untuk mengetahui apakah bentuk gelombang SPWM sudah sesuai untuk penyulutan MOSFET dan juga pengujian ini dilakukan agar pada saat sinyal digunakan untuk penyulutan MOSFET tidak terjadi kesalahan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan Osiloskop digital agar dapat melihat bentuk dari sinyal SPWM. Sinyal SPWM yang diamati adalah sinyal SPWM *output* Arduino dan sinyal SPWM *output driver* MOSFET

Mikrokontroller yang digunakan untuk membangkitkan sinyal SPWM adalah Arduino Mega 2560. Frekuensi *switching* sinyal SPWM yang digunakan adalah sebesar 4 kHz yang didapat dari *prescaler* program pada Arduino. Sinyal SPWM yang dihasilkan pada penelitian ini ada 6 sinyal yaitu HO1, HO2, HO3, dan LO1, LO2, LO3 yang masing-masing berbeda waktu aktifnya. Maksud dari sinyal HO1 adalah sinyal yang digunakan untuk penyulutan MOSFET *high side* fase satu, sedangkan LO1 adalah sinyal yang digunakan untuk penyulutan MOSFET *low side* fase satu. Untuk sinyal yang lain sama seperti sinyal HO1 dan LO1 hanya berbeda pada urutan fasenya. Bentuk sinyal SPWM keluaran Arduino dapat dilihat pada [Gambar 18](#).



Gambar 18. Sinyal SPWM output Arduino frekuensi 50 Hz

Pengujian sinyal SPWM *high* dan *low* keluaran Arduino ditunjukkan pada Gambar 18. Jarak antara sinyal SPWM *high* dan *low* adalah sebesar 180° yang menunjukkan bahwa keluaran Arduino bekerja secara bergantian. Bentuk gelombang yang ditampilkan hanya pada fase satu karena bentuk gelombang pada fase lainnya sama hanya berbeda pada pergeseran fasenya saja. Untuk tegangan pada sinyal SPWM yang dihasilkan Arduino mendekati 5 V sedangkan tegangan yang dibutuhkan untuk penyulutan MOSFET berkisar antara 10 - 20 V sesuai dengan *datasheet* MOSFET sehingga dibutuhkan *driver* agar dapat melakukan penyulutan MOSFET. Sinyal SPWM output *driver* MOSFET dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Sinyal SPWM output driver frekuensi 50 Hz

Pengujian sinyal SPWM keluaran *driver* MOSFET memiliki tegangan mendekati 12 V. Tegangan sinyal SPWM keluaran *driver* ini sudah cukup untuk menggerakkan MOSFET pada kondisi *fully on*. Keluaran dari *driver* langsung menuju ke kaki *Gate high side* MOSFET dan *low side* MOSFET pada masing-masing fase.

B. Pengujian Frekuensi Keluaran VFD

Pengujian frekuensi keluaran VFD dilakukan untuk mengetahui nilai dari frekuensi keluaran VFD serta membandingkan apakah frekuensi keluaran VFD sesuai dengan nilai pada alat ukur referensi yang digunakan. Alat ukur referensi yang digunakan adalah multimeter.

Setelah dilakukan pengambilan data pada frekuensi keluaran VFD dengan menggunakan alat ukur multimeter selanjutnya adalah membandingkan hasil dari frekuensi keluaran dari VFD dengan frekuensi *Setpoint* pada VFD dengan menggunakan persamaan simpangan (*error*). Hasil dari pengujian frekuensi keluaran VFD dapat dilihat pada TABEL 1.

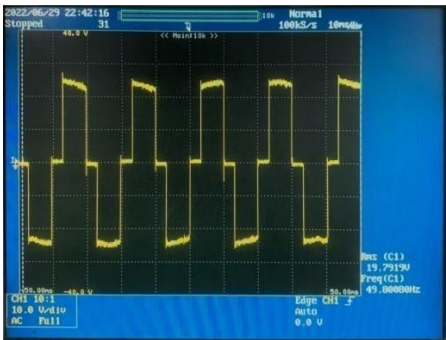
TABEL 1
PENGUJIAN FREKUENSI KELUARAN VFD

NO	Frekuensi setpoint	Frekuensi pengukuran	Error
	(Hz)	(Hz)	(%)
1	5	4.779	4.62
2	10	9.925	0.75
3	15	14.87	0.87
4	20	19.83	0.86
5	25	24.80	0.80
6	30	29.78	0.74
7	35	34.70	0.86
8	40	39.70	0.75
Nilai error rata-rata			
9	45	44.63	0.82
10	50	49.63	0.74
			1.181

Dari data hasil pengujian didapatkan nilai *error* dengan rata-rata 1.181%. Nilai yang didapat cukup kecil, sehingga dapat disimpulkan bahwa frekuensi keluaran dari VFD cukup akurat.

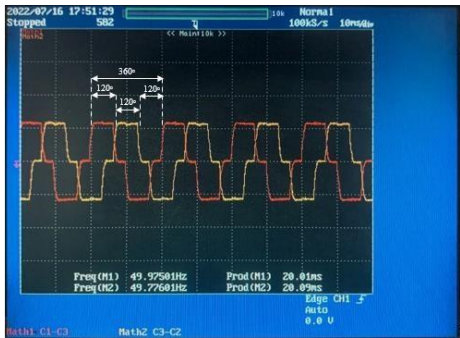
C. Pengujian Keluaran VFD Tanpa Beban

Pengujian keluaran VFD tanpa beban dilakukan untuk mengetahui bentuk gelombang dan tegangan keluaran VFD tanpa beban. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat ukur osiloskop dan multimeter digital. Bentuk gelombang keluaran dari VFD dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Gelombang VL-L keluaran VFD

Pada Gambar 20 bentuk gelombang tegangan keluar VFD masih berupa *modified square wave* karena belum diberikan *filter* untuk mereduksi harmonisa agar gelombang mendekati sinus murni. Pada pengujian awal tegangan DC yang diberikan sebesar 24 V untuk mengetahui apakah kesalahan pada VFD sebelum diberikan tegangan DC yang lebih besar. Bentuk gelombang keluaran VFD beda fase dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 21. Gelombang antar fase keluaran VFD

Pada pengujian ini juga dilakukan perbandingan antara tegangan keluaran VFD pada alat dan tegangan keluaran VFD secara teoritis atau perhitungan. Untuk perhitungan tegangan keluaran VFD dapat dilihat pada Persamaan (2). Tabel data hasil pengujian keluaran VFD tanpa beban dapat dilihat pada [TABEL 2](#).

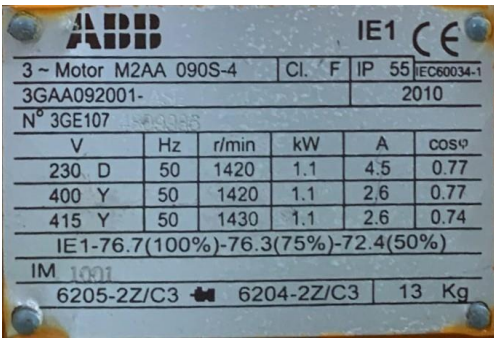
TABEL 2
PENGUJIAN KELUARAN VFD TANPA BEBAN

NO	f (Hz)	Vin (V)	Vdc (V)	VLine-line		Error (%)
				Pengukuran (V)	Perhitungan (V)	
1	10	102.3	140	111.5	109.2	2.106
2	20	101.8	138	109.3	107.7	1.485
3	30	101.4	135.8	106.8	106	0.755
4	40	100.9	134.1	104.7	104.6	0.095
5	50	100	132.6	102.9	103.5	0.580
Nilai rata-rata error						1.004

Dari data hasil pengujian dapat dilihat bahwa error tegangan keluaran VFD pada pengukuran dan perhitungan didapat nilai error rata-rata sebesar 1.004%. Nilai error ini termasuk kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa keluaran VFD hampir akurat. Nilai pada pengukuran tegangan tidak linear dapat diakibatkan karena *human error* pada saat pengukuran. Tegangan masukan pada VFD pada data diatas berubah-ubah ini dikarenakan pengaruh dari perubahan frekuensi. Jadi semakin kecil frekuensi maka tegangan inputnya semakin besar, begitu pun sebaliknya.

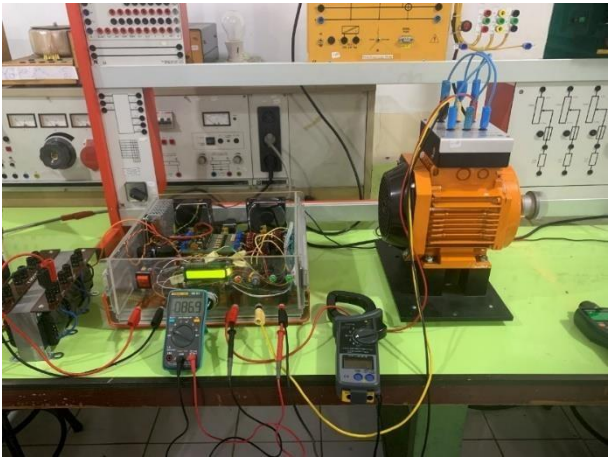
D. Pengujian Keluaran VFD Beban Motor Induksi 3 Fase

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari frekuensi keluaran VFD terhadap beban 3 fase. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan alat ukur Osiloskop, Multimeter, *Clampmeter*, dan *Tachometer*. Motor induksi 3 fase yang digunakan memiliki spesifikasi yang dapat dilihat pada [Gambar 22](#).



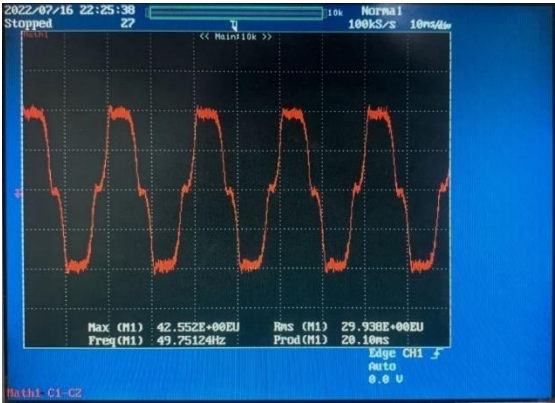
Gambar 22. Spesifikasi Motor Induksi 3 Fase

Pada pengujian dengan beban motor induksi 3 fase, motor dihubungkan delta karena tegangan yang keluar pada VFD adalah sebesar 220 V_{L-L} sehingga motor harus dihubungkan delta. Situasi pengujian VFD dengan beban motor induksi 3 fase ditunjukkan pada [Gambar 23](#).



Gambar 23. Pengujian keluaran VFD beban motor induksi 3 fase

Keluaran VFD yang diamati pada pengujian ini adalah bentuk gelombang, tegangan, arus, dan kecepatan motor. Bentuk gelombang pada pengujian ini dapat dilihat pada [Gambar 24](#). Gelombang yang dihasilkan masih berupa gelombang *modified square wave* dan hampir membentuk gelombang sinus.



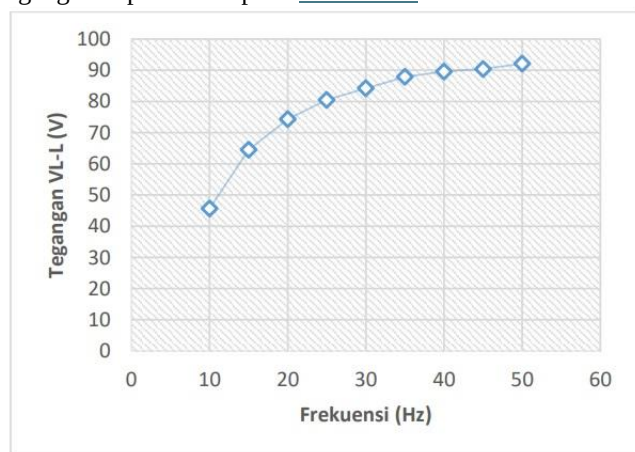
Gambar 24. Gelombang keluaran VFD beban motor induksi 3 fase

Pengujian dengan menggunakan beban motor induksi 3 fase ini juga dilakukan dengan memvariasikan frekuensi untuk mengetahui pengaruh tegangan, arus, dan kecepatan pada Motor induksi 3 fase. Data hasil percobaan dapat dilihat pada [TABEL 3](#), menunjukkan pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan, arus, dan kecepatan motor.

TABEL 3
DATA HASIL PERCOBAAN KELUARAN VFD BEBAN MOTOR
INDUKSI 3 FASE

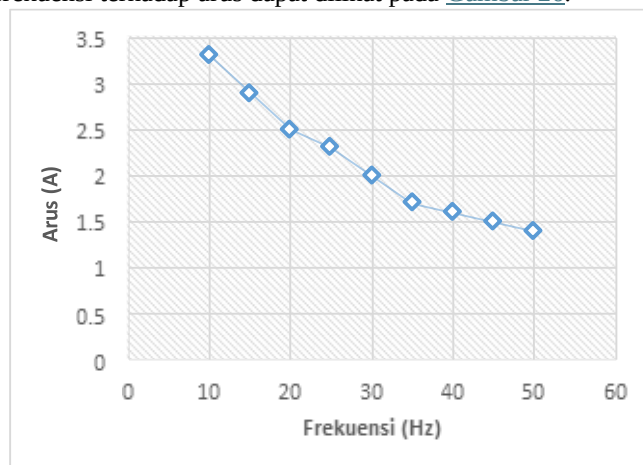
No.	Frekuensi (Hz)	V _{in} (V)	V _{L-L} (V)	I _L (A)	Kecepatan Motor (RPM)
1	10	75.5	45.66	3.3	278
2	15	85.1	64.5	2.9	444
3	20	91.3	74.3	2.5	593
4	25	94.6	80.5	2.3	742
5	30	96.7	84.2	2	891
6	35	98	87.9	1.7	1046
7	40	99	89.6	1.6	1186
8	45	99.7	90.4	1.5	1246
9	50	100	92.1	1.4	1454

Dari data hasil percobaan pada [TABEL 3](#) didapat tegangan, arus, dan kecepatan motor. Sesuai dengan data hasil percobaan didapat bahwa frekuensi mempengaruhi kecepatan pada Motor induksi 3 fase. Selain pengaruh frekuensi terhadap kecepatan motor, frekuensi juga mempengaruhi tegangan masukan VFD, tegangan keluaran VFD, dan arus pada VFD. Pada saat tegangan *drop* pada frekuensi rendah terjadi kenaikan arus, begitu pun sebaliknya tegangan mengalami kenaikan pada frekuensi tinggi dan arus semakin mengecil. Kenaikan arus yang terjadi dapat disebabkan karena perbandingan V/F keluaran tidak konstan sehingga menyebabkan arus terus meningkat saat frekuensi keluaran dkecilkan. Grafik pengaruh dari perubahan frekuensi terhadap tegangan dapat dilihat pada [Gambar 25](#).



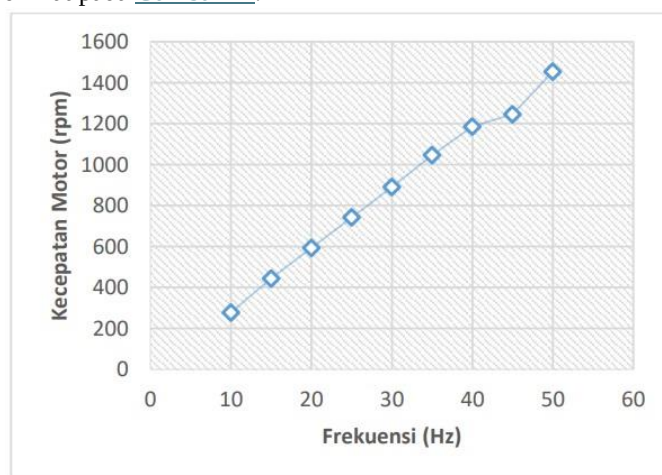
Gambar 25. Grafik pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan

Grafik pengaruh perubahan frekuensi terhadap tegangan pada [Gambar 25](#) dapat dilihat bahwa terjadi penurunan tegangan pada frekuensi kecil dan terjadi kenaikan tegangan pada frekuensi besar. Bentuk grafik kenaikan tegangan tidak linear, hal ini dikarenakan tidak dilakukan pengaturan tegangan keluaran pada alat VFD sehingga kenaikan tegangan tidak konstan dengan kenaikan frekuensi. Grafik pengaruh perubahan frekuensi terhadap arus dapat dilihat pada [Gambar 26](#).



Gambar 26. Grafik pengaruh perubahan frekuensi terhadap arus

Grafik dari pengaruh perubahan frekuensi terhadap arus pada [Gambar 26](#) dapat dilihat bahwa, terjadi kenaikan arus pada frekuensi kecil dan arus mengalami penurunan pada frekuensi besar. Jadi semakin besar frekuensi maka semakin kecil arus yang dihasilkan, semakin kecil frekuensi maka semakin besar arus yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan perbandingan antara V/F pada keluaran VFD tidak konstan sehingga arus yang dihasilkan besar saat frekuensi kecil. Grafik pengaruh frekuensi terhadap kecepatan motor dapat dilihat pada [Gambar 27](#).



Gambar 27. Grafik pengaruh perubahan frekuensi terhadap kecepatan motor

Dari grafik kecepatan motor pada [Gambar 27](#) dapat dilihat bahwa frekuensi berbanding lurus dengan kecepatan pada motor. Jadi semakin besar frekuensi maka semakin besar kecepatan pada motor. Pada data hasil percobaan didapat

bentuk grafik yang linear, tetapi terdapat satu nilai yang tidak linear, hal ini dapat diakibatkan karena *human error* pada saat pengukuran kecepatan motor menggunakan tachometer.

V. SIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari keseluruhan tahapan pada penyusunan skripsi ini mulai dari studi literatur, perancangan alat, pembuatan alat, dan pengujian alat, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Rancang bangun *Variable Frequency Drive* berbasis Arduino Mega 2560 telah berhasil dibuat dengan frekuensi yang dapat divariasikan dengan *range* 0 Hz sampai dengan 50 Hz.
- 2) Variable Frequency Drive yang telah dibuat dapat mengatur kecepatan motor dari 278 rpm sampai dengan 1454 rpm dengan frekuensi yang divariasikan dari 10 Hz sampai dengan 50 Hz.
- 3) Pengaturan kecepatan yang dilakukan dengan mengatur frekuensi pada VFD, yaitu semakin besar frekuensi yang dihasilkan maka semakin cepat putaran pada motor induksi dan semakin kecil frekuensi yang dihasilkan maka semakin lambat putaran pada motor induksi 3 fase.
- 4) Pada pengujian dengan beban motor induksi 3 fasa, frekuensi mempengaruhi tegangan keluaran VFD, semakin kecil frekuensi yang dihasilkan tegangan keluaran juga ikut menurun dan semakin besar frekuensi yang dihasilkan maka semakin besar juga tegangan yang dihasilkan.
- 5) Arus yang dihasilkan pada pengujian dengan beban motor induksi 3 fase meningkat saat frekuensi keluaran VFD kecil dan mengecil saat frekuensi keluaran VFD besar, hal ini disebabkan oleh tegangan keluaran VFD yang berubah-ubah.
- 6) Membalik arah putaran motor induksi 3 fase sudah berhasil dilakukan dengan cara mengubah jarak antar fase pada program SPWM.
- 7) Arduino Mega 2560, optocoupler P817, dan IC IR2110 dapat digunakan dengan baik untuk melakukan proses pemecutan pada 6 buah MOSFET.

B. Saran

Saran yang diberikan pada penelitian ini sekiranya dapat dikembangkan pada penelitian-penelitian selanjutnya. Adapun saran pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Pengaturan tegangan keluaran VFD diperlukan agar perbandingan antara V/F tetap konstan, sehingga arus yang dihasilkan tidak melebihi arus nominal pada Motor induksi 3 fase.
- 2) Pemilihan *filter* yang tepat pada keluaran VFD agar gelombang yang dihasilkan mendekati sinus murni.

REFERENSI

- [1] R. Ananda, "Pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan sistem kontrol pada variable speed drive (VSD)," Skripsi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, 2017.
- [2] M. Barnes, *Practical Variable Speed Drives and Power Electronics*, Oxford: Elsevier, 2003.
- [3] O. Rich dan W. Chapman, *Three-Level PWM DC/AC Inverter Using a Microcontroller*, NECAMSID, 2012.
- [4] M. H. Rashid, *Power Electronic Circuits, Devices, and Application*, Prentice Hall: New Jersey, 2003.
- [5] Asnil, Krismadinata dan I. Husnaini, "Desain dan analisis inverter tiga fasa menggunakan metode SPWM," *Seminar Nasional Teknik Elektro*, pp. 16-20, 2018.
- [6] G. Stevanov, T. Cekerovski, B.C. Dimitrova, dan S. Stefanova, "3-phase motor speed regulator based on microcontroller," *International Scientific Journal "Machines. Technologies. Materials"*, vol. XIV, no. 6, pp. 226229, 2020.
- [7] N. Desiwantiyani, "Rancang bangun inverter SPWM," Skripsi, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2018.
- [8] International Rectifier, "HEXFET Power MOSFET IRFP460 Datasheet".
- [9] International Rectifier, "High And Low Side Driver IR2110(S)PbF/IR2113(S)PbF datasheet".
- [10] M. Putra, "Perancangan dan pengujian pembangkit pulsa tegangan tinggi menggunakan FBT dengan metode PWM berbasis ATmega328," Skripsi, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2019.
- [11] C. T. Lumbantobing, "Rancang bangun monitoring pemakaian energi listrik maksimal 1000w berbasis smartphone Android via Wifi," Skripsi, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2020.
- [12] Aviyudi, "Perancangan filter LCL untuk aplikasi pada inverter satu fasa keluaran photovoltaic," Skripsi, Universitas Andalas Padang, Padang, 2014.