

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 State Of The Art

Tabel 2. 1 State Of The Art (SOTA)

Tahun	Judul	Metode	Hasil Penelitian
2016	Rancang Bangun Sistem Pengendali Kecepatan Motor DC Dengan Menggunakan Metode Pengendali PID Pada Mobil Listrik (Zec-01)	Pengendali PID	Sistem kecepatan mobil listrik ZEC-01 menggunakan sistem pengendali dengan metode PID dihubungkan dengan besaran PWM yang dimasukkan sebagai power motor. Setelah melakukan penalaan nilai K_p , T_i , dan T_d untuk sistem ditentukanlah nilai K_p sebesar 0.0279, nilai T_i sebesar 0.01, dan nilai T_d sebesar 0.01. Penerapan metode PID pada sistem kecepatan menghasilkan respon yang baik. Kriteria performansi sistem pengendali kecepatan mobil listrik menghasilkan overshoot 0, nilai settling time sebesar 10 detik, serta error steady state sebesar 0.7%.
2020	Perancangan Sistem Kendali Hybrid Pid Dan Fuzzy Logic Pada Pengendalian Kecepatan Motor Dc Menggunakan Metode Quarter Decay	Quarter Decay	Berdasarkan Penelitian Metode Quarter Decay pada PID menghasilkan sistem stabil dengan rise time yang cepat akan tetapi metode ini menghasilkan overshoot yang tinggi sebesar 14.83% dan ess 0.17, pengujian pengendali Fuzzy sistem tidak mampu mencapai nilai setpoint yang diberikan walaupun tidak terdapat overshoot, disaat kendali PID Quarter Decay digabungkan Fuzzy Logic overshoot berkurang menjadi 0.17 dan ess menjadi 0 walaupun waktu naik sedikit melambat. Pengujian kekokohan dari 3 pengendali tersebut pengendali Hybrid adalah pengendali terbaik karena hanya menghasilkan lonjakan sebesar 24 rad/s

2015	Prototipe Mobil Listrik Menggunakan Brushless Dc Motor 350 Watt	Brushless Motor dc	Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, prototipe Mobil listrik mengkonsumsi daya sebesar 6 Wh selama 15 menit dengan kecepatan maksimal 38 Km/Jam. Mobil listrik pada satu putaran lintasan sepanjang 800 mete membutuhkan konsumsi daya 2,56 Wh dengan beban pengemudi seberat 50 Kg tanpa melepas bukaan throttle.
2017	Rancang Bangun Mobil Listrik Multi Penggerak Berbasis Fuzzy Neural Network	Fuzzy Neural	Menemukan hasil bahwasanya untuk mendapatkan dan mengembangkan model kontrol mobil listrik multi penggerak yang berbasis Fuzzy Neural Network. Kecepatan dan beban yang berubah-ubah dipetakan dari model aliran daya listrik menjadi model dengan menggunakan jaringan syaraf tiruan (Neural Network) untuk proses sinkronisasi antar penggerak
2015	Desain dan Simulasi Kontrol Kecepatan Motor BLDC menggunakan Metode Fuzzy- PID Controller untuk aplikasi sepeda motor listrik	Kombinasi Dari Fuzzy- PID Controller	Menemukan hasil bahwasanya penulis mencoba untuk mendesain rangkaian kontrol motor BLDC dengan menggunakan Fuzzy logic controller (FLC), didapatkan bahwa pada kecepatan 1000 RPM dengan beban 2 N.m error steady state dari Fuzzy PID Controller sebesar 0.005% dan response time sebesar 0.645 detik sedangkan kontroler PID sebesar 0,035% dengan response time sebesar 0.64536 detik. Ketika kecepatannya bervariasi kedua kontroler dapat mengikuti referensi yang diberikan, namun error steady state dari kontroler PID nilainya lebih besar daripada Fuzzy-PID Controller Sehingga dapat disimpulkan bahwa kontroler Fuzzy-PID jauh lebih baik daripada kontroler PID

2017	Sistem Pengendali Kecepatan Motor DC Dengan Metode PID Pada Mobil Listrik	PID	<p>Dalam perancangan sebuah mobil listrik, tentunya tidak lepas dari kecepatan dan performansi dari mobil listrik itu sendiri. Maka dari itu untuk mengontrol kecepatan mobil listrik, penulis menggunakan metode PID untuk mengendalikan kecepatan motor DC. Metode PID ini digunakan karena sangat baik untuk mengendalikan dan menentukan kestabilan motor DC dengan penggunaan nilai K_p sebagai setpoint serta nilai K_i dan K_d sebagai manipulated variabel. Penerapan metode PID pada pengendali kecepatan, menghasilkan respon yang baik dengan uji coba pada persentase kecepatan mobil listrik sebesar 20 %, 40%, 60%, 80% dan 100 %.</p> <p>Kata kunci: Mobil Listrik, Motor DC, PID</p>
------	---------------------------------------------------------------------------	-----	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

2.2 Sejarah Mobil Listrik

Kendaraan listrik (EV) menggunakan motor listrik untuk traksi, dan baterai kimia, sel bahan bakar, ultrakapasitor, dan/atau roda gila untuk sumber energi. Kendaraan listrik memiliki banyak keunggulan dibandingkan kendaraan mesin pembakaran internal (ICEV) konvensional, seperti tidak adanya emisi, efisiensi tinggi, kemandirian dari minyak bumi, dan ketenangan dan kelancaran[8]. Kendaraan listrik biasanya dikaitkan dengan manfaat bagi lingkungan dan penghematan energi. Manfaat ini termasuk mengurangi polusi lokal dari kendaraan itu sendiri, mengurangi ketergantungan pada minyak dan bahan bakar fosil lainnya dan pengurangan emisi karbon. Saat mempertimbangkan pengenalan kendaraan listrik, pemahaman menyeluruh tentang efek terhadap lingkungan sangat diperlukan.[9]

Kendaraan listrik pertama dibuat oleh orang Prancis Gustave Trouvé pada tahun 1881. Itu adalah sepeda roda tiga yang ditenagai oleh motor DC 0,1 hp yang

ditenagai oleh baterai timbalasam. Seluruh kendaraan dan pengemudinya memiliki berat sekitar 160 kg. Sebuah kendaraan yang mirip dengan ini dibangun pada tahun 1883 oleh dua profesor Inggris[9][10].



Gambar 2. 1 Gustave Trouvé Tricycle 1881[11]

Kombinasi baru-baru ini dari masalah lingkungan, geo-politik, ekonomi, dan kesehatan yang terkait dengan transportasi bertenaga ICE telah menciptakan lahan subur untuk minat dan investasi baru dalam kendaraan penggerak listrik dan transportasi listrik. Saat ini, ada lebih dari 1 miliar kendaraan terdaftar di dunia, kira-kira satu untuk setiap tujuh orang di Bumi. Jumlah itu akan meningkat secara drastis selama beberapa decade mendatang dengan meningkatnya kekayaan dan daya beli di antara warga negara di negara-negara berkembang pesat di Asia dan Amerika Selatan. Sudah, lebih dari 80 juta kendaraan diproduksi di seluruh dunia setiap tahun. Jelas ada kebutuhan untuk membuat mobilmobil ini lebih bersih, lebih efisien, dan tidak terlalu berbahaya secara sosial untuk menghindari bencana lingkungan dan ekonomi di abad berikutnya[12][13][14][15].



Gambar 2. 2 Tesla Model S[16]

2.2.1 Perkembangan Mobil Listrik

Dalam konteks pengembangan kendaraan listrik, teknologi baterai lah yang paling lemah, menghalangi jalan kendaraan listrik ke pasar. Upaya besar dan investasi telah dimasukkan ke dalam penelitian baterai, denganniat meningkatkan

kinerja untuk memenuhi kebutuhan kendaraan listrik. Performanya jauh di belakang kebutuhan, terutama kapasitas penyimpanan energi per satuan berat dan volume. Kemampuan penyimpanan energi baterai yang buruk ini membatasi kendaraan listrik hanya untuk beberapa aplikasi tertentu, seperti di bandara dan stasiun kereta api, pada rute pengiriman surat, dan di lapangan golf, dll [15].



Gambar 2. 3 Elictric Golf Car[16]

Faktanya, bagaimanapun kendaraan listrik tidak akan pernah mampu menantang kendaraan berbahan bakar cair bahkan dengan nilai optimis dari kapasitas energi baterai. Kendaraan Listrik Modern, Listrik Hibrida, dan Sel Bahan Bakar dalam beberapa tahun terakhir, penelitian teknologi kendaraan canggih telah beralih ke kendaraan listrik hibrida serta kendaraan sel bahan bakal. Upaya paling signifikan dalam pengembangan dan komersialisasi kendaraan listrik hibrida dilakukan oleh pabrikan Jepang. Pada tahun 1997, Toyota merilis sedan Prius di Jepang. Honda juga merilis Insight dan Civic Hybrid. Kendaraan ini sekarang tersedia di seluruh dunia. Mereka mencapai angka konsumsi bahan bakar yang sangat baik. Kendaraan Toyota Prius dan Honda Insight memiliki nilai sejarah karena merupakan kendaraan hybrid pertama yang dikomersialkan di era modern untuk menjawab permasalahan konsumsi bahan bakar kendaraan pribadi [15].



Gambar 2. 4 Mobil Hybrid Toyota[17]

2.3 Motor DC

Motor yang beroperasi pada arus DC disebut sebagai Motor DC dan motor yang menggunakan arus AC disebut sebagai motor AC. Umumnya kamu tidak akan terlalu banyak menjumpai motor AC tetapi motor DC hampir digunakan dimana saja, yang mana di bidang listrik dinamai DC motor.

Motor DC adalah motor listrik yang merupakan perangkat elektromekanis yang menggunakan interaksi medan magnet dan konduktor untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik putar, dimana motor DC dirancang untuk dijalankan dari sumber daya arus searah (DC).[18]



Gambar 2. 5 Motor DC[19]

2.3.1 Prinsip Kerja Motor DC

Komponen utama dari Motor DC adalah Winding/lilitan, Magnet, Rotors, Brushes, Stator dan sumber arus searah (Arus DC). Ketika armature ditempatkan dalam medan magnet yang dihasilkan oleh magnet maka armature diputar dengan menggunakan arus searah, hal ini menghasilkan gaya mekanik. Dengan memanfaatkan putaran motor DC banyak jenis pekerjaan yang dapat dikerjakan.[18]

2.3.2 Jenis - Jenis Motor DC

Motor DC atau Motor Arus Searah merupakan aktuator yang paling umum digunakan untuk menghasilkan gerakan terus menerus dimana kecepatan putarannya dapat dengan mudah dikontrol, hal inilah yang menjadikan motor DC sangat ideal untuk digunakan dalam aplikasi pengaturan kontrol kecepatan, kontrol tipe servo, dan / atau positioning.

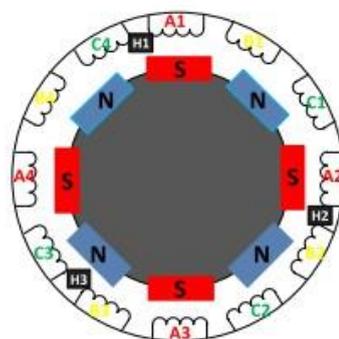
Motor DC terdiri dari dua bagian penting, yaitu "Stator" yang merupakan bagian diam dan "Rotor" yang merupakan bagian yang berputar, dari kedua bagian penting motor ini hasilnya terdapat tiga jenis Motor DC yakni :

1. Motor DC Brush
2. Motor DC Brushless
3. Motor DC Servo[18]

Motor DC yang akan di pakai oleh penulis Motor BLDC (Motor *Brushless* DC)

2.4 Motor *Brushless* DC (Motor BLDC)

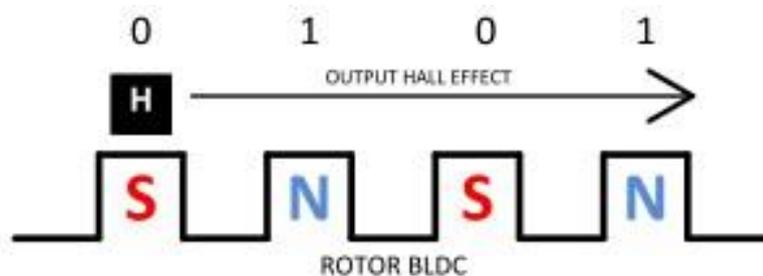
Motor *brushless* DC atau biasa disebut BLDC, merupakan motor *synchronous* AC tiga fasa yang membutuhkan tegangan DC sebagai sumbernya. Motor jenis ini mempunyai magnet permanen pada bagian rotor, sedangkan elektromagnet-nya berada pada bagian stator nya. Sesuai dengan namanya, Motor BLDC tidak menggunakan sikat atau brush untuk pergantian medan magnet (komutator), melainkan menggunakan komutator elektronik.[20][21]. Sistem komutasi elektrik ini diartikan sebagai fungsi dari switch electronic. Komutator elektronik ini terdiri dari kombinasi transistor atau biasanya menggunakan MOSFET atau IGBT yang membutuhkan sinyal atau pulsa penyalaan, dan dapat mengaktifkan koil dengan waktu yang tepat sehingga dapat menggerakkan motor [21][22][23].



Gambar 2. 6 Konstruksi motor BLDC[23]

Pada gambar 16 disajikan motor BLDC dengan 12 belitan stator dan 8 kutub magnet pada rotor. Untuk memutar motor BLDC harus mengetahui posisi rotor

yang terletak di dalam motor BLDC digunakan untuk mengontrol belitan pada stator yang mana akan diberi tegangan sesuai polaritasnya untuk menarik atau mendorong magnet pada rotor sehingga rotor dapat bergerak atau berputar. Untuk mendeteksi posisi rotor dapat menggunakan Hall effect sensor yang ditempelkan pada stator. Di dalam motor BLDC memiliki tiga hall effect sensor yang dipasang di stator. Tiga buah hall effect sensor diletakkan pada posisi sebagai berikut : H1 pada posisi $\theta = 360^\circ$, H2 pada posisi $\theta = 60^\circ$, H3 pada posisi $\theta = 120^\circ$ terhadap stator. Sensor hall effect memberikan keluaran berlogika “1” saat mendeteksi kutub magnet utara (N) dan berlogika “0” saat mendeteksi kutub magnet selatan (S). [23][24].



Gambar 2. 7 Pembacaan Hall Effect[23]

Tabel 2. 2 Data Pembacaan Hall Effect 6 Langkah

H1	H2	H3	V _{an}	V _{bn}	V _{cn}
0	0	1	-	+	0
1	0	1	0	+	-
1	0	0	+	0	-
1	1	0	+	-	0
0	1	1	0	-	+
0	1	1	-	0	+

2.4.1 Bagian - bagian dari motor brushless DC

Bagian - bagian dari motor brushless DC, antara lain:

A. Stator

Stator adalah bagian pada motor yang diam/statis dan berfungsi sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Pada motor DC brushless statornya terdiri dari 12 belitan

(elektromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor DC brushless terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan pada motor DC konvensional stator-nya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen.[25][26]

B. Rotor

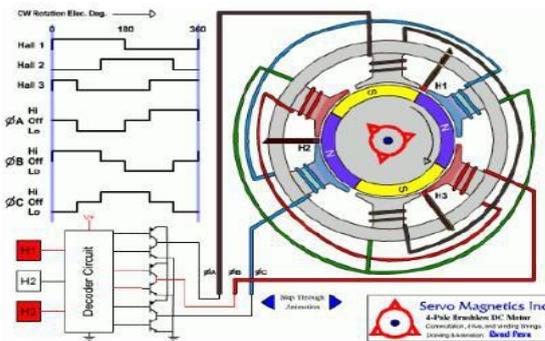
Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor DC brushless bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara brushes (sikat) yang terhubung. Rotor dibuat dari magnet permanen dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub Magnet Utara (N) atau Selatan (S). Bahan material magnetis yang baik sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang baik pula. Biasanya magnet permanen dibuat menggunakan magnet ferrit. Tetapi saat ini dengan kemajuan teknologi, campuran logam sudah kurang populer untuk digunakan. Meskipun dinilai lebih murah, magnet ferrit mempunyai kekurangan yaitu kerapatan fluks yang rendah sebagai bahan material yang diperlukan untuk membuat rotor[25][26].

C. Sensor Hall Effect

Sensor Hall effect adalah sebuah perangkat yang dapat merubah sebuah medan magnet menjadi tegangan listrik. Sensor ini bekerja berdasarkan fenomena efek hall yaitu ketika terdapat arus yang mengalir pada suatu plat logam atau sebuah semikonduktor yang berada pada suatu medan magnet yang tegak lurus, maka akan terjadi gaya Lorentz yang menyebabkan elektron terdorong ke salah satu sisi plat dan menimbulkan tegangan kecil pada yang dapat diukur dari kedua sisi plat. Pada penelitian ini, hall effect sensor digunakan untuk mendeteksi keberadaan magnet permanen yang telah dipasang pada jeruji roda sepeda. Jarak waktu deteksi akan digunakan untuk menghitung kecepatan roda.[27]

2.5 Prinsip Kerja Motor Brushless DC

Prinsip kerja motor BLDC sebenarnya sama dengan motor DC konvensional namun berbeda pada proses komutasinya. Motor BLDC menggunakan teknologi elektronik dalam proses komutasinya, yaitu sensor Hall dan kontroler.



Gambar 2. 8 Skema Kerja Motor BLDC[28]

Pertama, hall sensor H1 dan H3 bernilai 1 karena mengalami perubahan medan magnet. Sehingga kontroler mengalirkan arus pada lilitan B dan C. Lilitan B menjadi kutub utara dan lilitan C menjadi kutub selatan. Kutub utara oleh lilitan B memberikan tolakan pada kutub utara magnet rotor, sedangkan kutub selatan lilitan C menarik kutub utara magnet rotor.

Langkah kedua, hanya sensor H1 yang bernilai “high”, sehingga kontroler akan menginstruksikan agar lilitan A dan B harus dialiri arus. Lilitan A menghasilkan kutub selatan dan lilitan B tetap menghasilkan kutub utara. Kutub selatan lilitan A akan menolak kutub selatan pada magnet rotor. Sedangkan kutub utara lilitan B menolak kutub utara dari magnet rotor.

Langkah ketiga, sensor H1 dan H2 bernilai 1. Sehingga kontroler menginstruksikan agar lilitan A dan C dialiri arus. Lilitan A tetap menghasilkan kutub selatan dan lilitan C menghasilkan kutub utara. Kutub selatan lilitan A akan menolak kutub selatan dan menarik kutub utara pada magnet rotor. Sedangkan kutub utara lilitan C menarik kutub selatan dari magnet rotor.

Langkah keempat, hanya sensor H2 yang bernilai 1. Sehingga kontroler menginstruksikan agar lilitan B dan C dialiri arus. Lilitan B menghasilkan kutub selatan dan lilitan C tetap menghasilkan kutub utara. Kutub selatan lilitan B menolak kutub selatan pada magnet rotor. Sedangkan kutub utara lilitan C menarik

kutub selatan dari magnet rotor. Langkah kelima, sensor H2 dan H3 bernilai 1. Sehingga kontroler menginstruksikan agar lilitan A dan B dialiri arus. Lilitan A menghasilkan kutub utara dan lilitan B tetap menghasilkan kutub selatan. Kutub utara lilitan A akan menolak kutub utara dan menarik kutub selatan pada magnet rotor. Sedangkan kutub selatan lilitan B menolak kutub selatan dari magnet rotor.

Langkah keenam atau terakhir pada siklus komutasi, hanya sensor H3 yang bernilai 1. Sehingga kontroler menginstruksikan agar lilitan A dan C dialiri arus. Lilitan A tetap menghasilkan kutub utara dan lilitan C menghasilkan kutub selatan. Kutub utara lilitan A akan menarik kutub selatan dan menolak kutub utara pada magnet rotor. Sedangkan kutub selatan lilitan C menarik kutub utara dari magnet rotor.

Keenam proses di atas mengalami pengulangan hingga membentuk suatu siklus. Hal inilah yang menyebabkan motor terus berputar secara kontinyu selama sumber arus DC masih ada.[26][29]

Secara kinerja motor brushless DC ialah sebuah motor dengan permanen magnet menggunakan rangkaian elektronik untuk pengontrol dan sensor posisi dengan karakteristik yang hampir sama dengan motor DC konvensional namun tidak memiliki komutator atau sikat. Motor bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet

A. Keuntungan Menggunakan Motor BLDC

1. Efisiensi Tinggi. Tidak ada kehilangan tegangan oleh cincin komutator dan brushes.
2. Hemat Biaya Perawatan. Hal ini dikarenakan brushes seperti pada motor konvensional tidak digunakan lagi.
3. Perbandingan Torsi-Ukuran Lebih Besar. Hal ini disebabkan medan tarik yang dihasilkan oleh stator sepenuhnya diterima oleh rotor karena rotor terbuat dari medan magnet permanen.
4. Polusi Suara yang Lebih Rendah. Hal ini dikarenakan gesekan yang dihasilkan brushes pada motor konvensional dapat dieliminasi.

5. Pendinginan yang Lebih Mudah. Kabel pada motor BLDC menempel pada casing. Sehingga memudahkan sistem pendinginan. Hal ini merupakan salah satu alasan pemilihan motor BLDC untuk masa operasi yang panjang seperti pada mobil listrik.
6. Tidak Terjadi Bunga Api. Hubungan antara brush dan komutator yang longgar menyebabkan terjadinya percikan api, hal ini berbahaya jika motor digunakan pada industri yang sensitif terhadap percikan api, tetapi dengan menggunakan BLDC motor, dengan tidak adanya komutator dan brush menyebabkan tidak adanya percikan api yang dirimbulkan oleh motor.[28]

B. Kekurangan Menggunakan Motor BLDC

1. Biaya Pembuatan Mahal. Motor BLDC mempunyai banyak komponen mahal.
2. Sistem Pengendalian yang Rumit dan Mahal. Hal ini dikarenakan penggunaan komutator elektronik yang menggantikan komutator mekanik. Selain itu, pengontrol kecepatan motor BLDC juga lebih rumit daripada motor DC konvensional, sehingga juga ikut menaikkan harga.
3. Kontroler Mahal. Seringkali, kontroler motor BLDC justru lebih mahal daripada motor itu sendiri.[28]

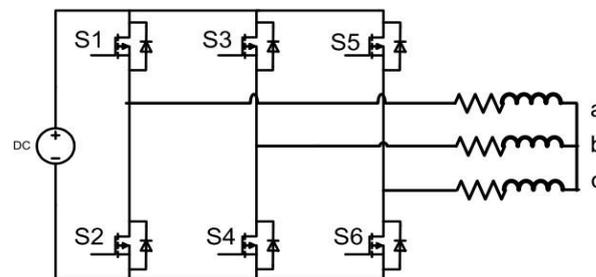
2.6 Kontroler Motor BLDC

Kontroler pada motor DC brushless berperan sangat penting dan dapat dikatakan sebagai penunjang utama operasi motor DC brushless karena motor DC brushless membutuhkan suatu trigger pulsa yang masuk ke bagian elektromagnetik (stator) motor DC brushless untuk memberikan pengaturan besarnya arus yang mengalir sehingga putaran motor dapat diatur secara akurat [29]. Inverter pada motor DC brushless berperan untuk mengubah tegangan DC yang masuk controller menjadi tegangan AC karena jenis motor DC brushless biasanya memiliki multipole tiga phase maka dibutuhkan inverter tiga phase tegangan DC menjadi AC agar dapat berputar.[23]

2.6.1 Bagian Kontroller motor BLDC

A. Inverter Six Step Comutation

Motor brushless DC merupakan motor Synchronous AC 3 fasa maka membutuhkan sebuah desain inverter yang mampu mengubah tegangan DC ke AC 3 fasa sebagai input pada motor BLDC.[23] Inverter drive sendiri memiliki banyak metode untuk mengontrol nya, namun yang lebih efektif yaitu dengan menggunakan metode six step atau yang biasa disebut dengan metode 6 pensaklaran.



Gambar 2. 9 Rangkaian Inverter 3 Fasa[23]

Gambar diatas merupakan gambar sinyal *duty cycle* pwm dengan keluaran sinyal persegi (*square*). Pada lebar sinyal *high* merupakan lama nya waktu posisi sinyal *on*, sedangkan *low* merupakan sinyal lama nya waktu posisi *off*. Dengan gambar tersebut mampu diatur dengan mengatur *duty cycle* yang dirumuskan sebagai berikut:

Sumber tegangan input inverter dapat menggunakan baterai, tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lain. Inverter dalam proses konversi tegangan DC menjadi tegangan AC membutuhkan suatu penaik tegangan berupa *step up transformer*. Rangkaian inverter pada pengendali motor BLDC berupa mosfet dengan penyulutan secara bergantian dan terstruktur. Keluaran inverter berupa tegangan yang dapat diatur dan tegangan yang tetap, tegangan output yang biasa dihasilkan adalah 5 volt, 36 volt dan 48 volt sesuai dengan kebutuhan tegangan pada nemplate motor. Pengendali Motor BLDC memiliki fungsi utama sebagai sistem pemutar motor BLDC serta mengatur putarannya. Komponen pokok pada controller adalah bagian microprosesor. Pada mikro ini sudah terdapat program bagaimana

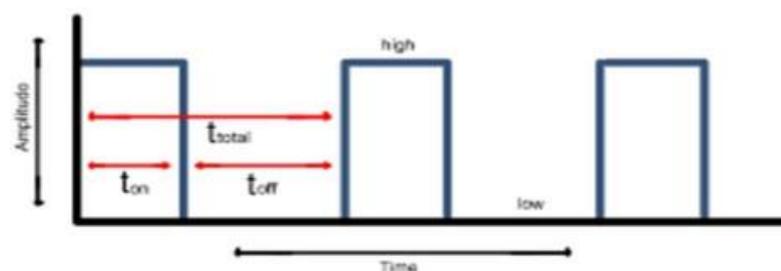
mengendalikan mosfet sesuai urutannya, memberikan eksekusi PWM sesuai masukan berupa pedal gas (*Throttlet*)

Tabel 2. 3 Operasi 6 Mode Pensaklaran Pada Inverter 3 Fasa[23]

S6	S5	S4	S2	S1	Van	Vbn	Vcn
0	0	0	1	0	-Vdc	Vdc	0
1	0	0	0	0	0	Vdc	-Vdc
1	0	0	0	1	Vdc	0	-Vdc
0	0	1	0	1	Vdc	-Vdc	0
0	1	1	0	0	0	-Vdc	Vdc
0	0	0	1	0	-Vdc	0	Vdc

B. PWM Six-Step Comutation Metode

PWM six step adalah metode pemberian pulsa PWM yang berbentuk gelombang trapezoid namun metode ini banyak digunakan dalam pengendalian BLDC. Pada pengendalian BLDC motor dengan metode Pulse Width Modulation (PWM) six step terdapat ketentuan-ketentuan yang harus dipenuhi agar sistem berjalan[20].



Gambar 2. 10 Sinyal Duty Cycle PWM [23]

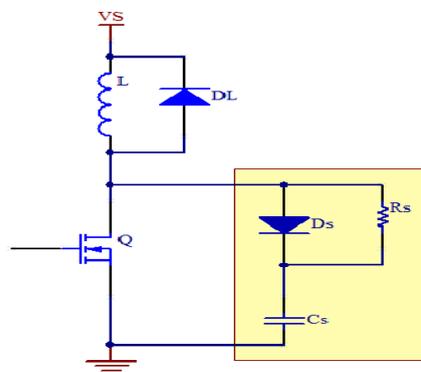
2.7 MOSFET

Mosfet umumnya bekerja dengan memvariasikan lebar saluran elektroda dengan tekanan pada elektroda yang disebut dengan gate (gerbang), terletak diantara gerbang dan saluran, dan diisolasi dengan lapisan tipis silikon oksida. Komponen ini dengan kecepatan switching yang sangat tinggi bahkan kecepatan switching memiliki orde nanodetik dan idikendalikan oleh tegangan serta

memerlukan arus masukan yang kecil merupakan beberapa ciri-ciri dari MOSFET. Apabila kecepatan tinggi diperlukan maka MOSFET merupakan komponen terbaik karena MOSFET dapat bekerja pada frekuensi 20KHz-200KHz [30].

Prinsip dasarnya perumpamaan dari cara kerja MOSFET dapat dilihat seperti pada pengaturan aliran air pipa menggunakan kran. Elektron akan mengalir dari kaki Source(S) ke kaki Drain (D). Besarnya arus keluaran akan sama dengan arus masukan ($I_D = I_S$). Besar kecilnya tegangan yang masuk pada kaki Gate (G) akan mempengaruhi besar kecilnya arus. namun dikarenakan tipisnya lapisan oksidasi pada MOSFET mengakibatkan MOSFET mudah rusak karena pembuangan elektrostatik (Electrostatic Discharge)[31].

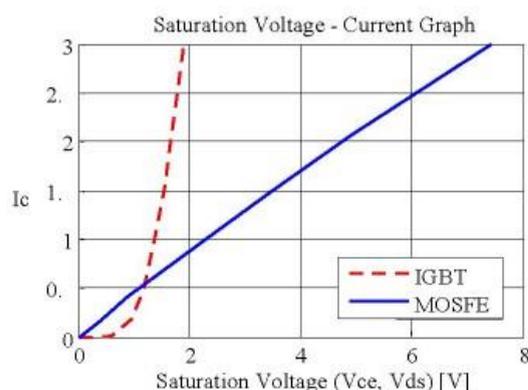
IGBT dan MOSFET merupakan dua teknologi komponen elektronika dasar yang sangat populer dalam konverter berdaya rendah. Beberapa hal yang menyebabkannya antara lain keduanya merupakan controllable switch dan tidak membutuhkan gate driver yang rumit. Pertimbangan lain adalah tersedia dalam berbagai ukuran arus, tegangan, serta jangkauan switching frekuensi yang besar dari audible frequency hingga ratusan kilo Hertz.



Gambar 2. 11 Rangkaian snubber pada rangkaian switch MOSFET[31]

Dalam kasus MOSFET, aliran arus pada dasarnya resistif dengan resistansi on pada tegangan drain rendah. Garis putus-putus pada Gambar. menunjukkan contoh karakteristik keluaran IGBT pada arus rendah. Garis padat menggambarkan karakteristik MOSFET. Pada Gambar. mengatakan, kehilangan konduksi MOSFET lebih kecil dari pada IGBT di bawah arus sakelar 1,1A. Itu berarti inverter

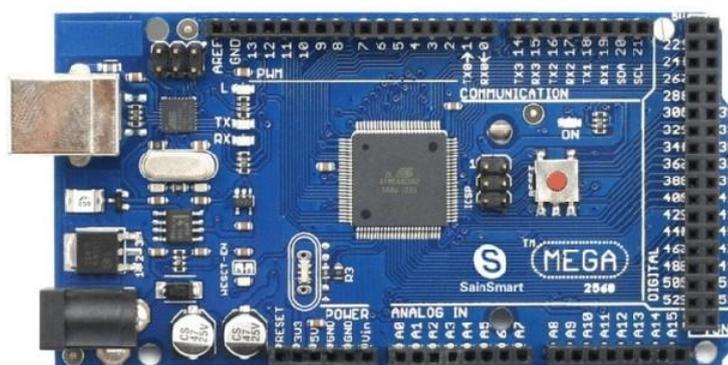
MOSFET memiliki efisiensi yang lebih unggul daripada inverter IGBT di bawah level arus tertentu. Tetapi titik persimpangan ini bergerak turun saat suhu sambungan naik karena suhu sambungan mempengaruhi resistansi-on MOSFET lebih dari tegangan saturasi IGBT [30][32]



Gambar 2. 12 Karakteristik Keluaran IGBT dan MOSFET[32]

2.8 Arduino mega

Arduino Mega 2560 adalah sebuah board arduino yang menggunakan IC Mikrokontroler 2560. Board ini memiliki Pin I/O yang relatif banyak, 54 digital Input/Output, 15 buah di antaranya dapat digunakan sebagai output PWM, 16 buah analog input, 4 UART (port serial). Arduino Mega 2560 di lengkapi kristal 16 Mhz, koneksi USB, adaptor listrik, header ICSP, dan tombol reset[33]



Gambar 2. 13 Arduino Mega[23]

Tabel 2. 4 Spesifikasi Arduino MEGA 2560

No	Nama	Keterangan
1.	Mikrokontroler	ATMega2560
2.	Tegangan Operasi	5V
3.	Tegangan <i>Input</i>	7-12V
4.	Batas Tegangan <i>Input</i>	6-20V
5.	Pin <i>Digital I/O</i>	54 (15 pin output PWM)
6.	Pin <i>Analog Input</i>	16 pin
7.	Arus DC per pin I/O	40 Ma
8.	Arus DC pin 3.3V	50 mA
9.	<i>Flash Memory</i>	256 KB (8 KB Bootloader)
10.	SRAM	8 KB
11.	EEPROM	4 KB
12.	<i>16 Clock Speed</i>	17 MHz

Arduino Mega dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal. Sumber daya dipilih secara otomatis. Sumber daya eksternal (non-USB) dapat berasal baik dari adaptor AC-DC atau baterai. Adaptor dapat dihubungkan dengan mencolokkan steker 2,1 mm yang bagian tengahnya terminal positif ke jack sumber tegangan pada papan. Jika tegangan berasal dari baterai dapat langsung dihubungkan melalui header pin Gnd dan pin Vin dari konektor POWER

Papan Arduino ATmega2560 dapat beroperasi dengan pasokan daya eksternal 6 Volt sampai 20 Volt. Jika diberi tegangan kurang dari 7 Volt, maka pin 5 Volt mungkin akan menghasilkan tegangan kurang dari 5 Volt dan ini akan membuat papan menjadi tidak stabil. Jika sumber tegangan menggunakan lebih dari 12 Volt, regulator tegangan akan mengalami panas berlebihan dan bisa merusak papan. Rentang sumber tegangan yang dianjurkan adalah 7 Volt sampai 12 Volt. Pin tegangan yang tersedia pada papan Arduino adalah sebagai berikut:

1. VIN : Input tegangan untuk papan Arduino ketika menggunakan sumber daya eksternal (sebagai 'saingan' tegangan 5 Volt dari koneksi USB atau sumber daya ter-regulator lainnya).

Masing-masing dari 54 digital pin pada Arduino Mega dapat digunakan sebagai input atau output, menggunakan fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()`. Arduino Mega beroperasi pada tegangan 5 volt. Setiap pin dapat memberikan atau menerima arus maksimum 40 mA dan memiliki resistor pull-up internal (yang terputus secara default) sebesar 20-50 KOhms. Selain itu, beberapa pin memiliki fungsi khusus, antara lain:

1. Serial : 0 (RX) dan 1 (TX); Serial 1 : 19 (RX) dan 18 (TX); Serial 2 : 17 (RX) dan 16 (TX); Serial 3 : 15 (RX) dan 14 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan mengirimkan (TX) data serial TTL. Pins 0 dan 1 juga terhubung ke pin chip ATmega16U2 Serial USB-to-TTL.
2. Eksternal Interrupt : Pin 2 (interrupt 0), pin 3 (interrupt 1), pin 18 (interrupt 5), pin 19 (interrupt 4), pin 20 (interrupt 3), dan pin 21 (interrupt 2). Pin ini dapat dikonfigurasi untuk memicu sebuah interupsi pada nilai yang rendah, meningkat atau menurun, atau perubah nilai.
3. SPI : Pin 50 (MISO), pin 51 (MOSI), pin 52 (SCK), pin 53 (SS). Pin ini mendukung komunikasi SPI menggunakan perpustakaan SPI. Pin SPI juga terhubung dengan header ICSP, yang secara fisik kompatibel dengan Arduino Uno, Arduino Duemilanove dan Arduino Diecimila.
4. LED : Pin 13. Tersedia secara built-in pada papan Arduino ATmega2560. LED terhubung ke pin digital 13. Ketika pin diset bernilai HIGH, maka LED menyala, dan ketika pin diset bernilai LOW, maka LED padam.
5. TWI : Pin 20 (SDA) dan pin 21 (SCL). Yang mendukung komunikasi TWI menggunakan perpustakaan wire. Perhatikan bahwa pin ini tidak di lokasi yang sama dengan pin TWI pada Arduino Duemilanove atau Arduino Diecimila.

Arduino Mega2560 memiliki 16 pin sebagai analog input, yang masing-masing menyediakan resolusi 10 bit (yaitu 1024 nilai yang berbeda). Secara default pin ini dapat diukur/diatur dari mulai Ground sampai dengan 5 Volt, juga memungkinkan untuk mengubah titik jangkauan tertinggi atau terendah mereka

menggunakan pin AREF dan fungsi analogReference. Ada beberapa pin lainnya yang tersedia, antara lain:

1. AREF : Referensi tegangan untuk input analog. Digunakan dengan fungsi analogReference.
2. RESET : Jalur LOW ini digunakan untuk mereset (menghidupkan ulang) mikrokontroler. Jalur ini biasanya digunakan untuk menambahkan tombol reset pada shield yang menghalangi papan utama Arduino.

Arduino Mega2560 memiliki sejumlah fasilitas untuk berkomunikasi dengan komputer, dengan Arduino lain, atau dengan mikrokontroler lainnya. Arduino ATmega328 menyediakan 4 hardware komunikasi serial UART TTL (5 Volt). Sebuah chip ATmega16U2 (ATmega8U2 pada papan Revisi 1 dan Revisi 2) yang terdapat pada papan digunakan sebagai media komunikasi serial melalui USB dan muncul sebagai COM Port Virtual (pada device komputer) untuk berkomunikasi dengan perangkat lunak pada komputer, untuk sistem operasi Windows masih tetap memerlukan file inf, tetapi untuk sistem operasi OS X dan Linux akan mengenali papan sebagai port COM secara otomatis. Perangkat lunak Arduino termasuk didalamnya serial monitor memungkinkan data tekstual sederhana dikirim ke dan dari papan Arduino. LED RX dan TX yang tersedia pada papan akan berkedip ketika data sedang dikirim atau diterima melalui chip USB-to-serial yang terhubung melalui USB komputer (tetapi tidak untuk komunikasi serial seperti pada pin 0 dan 1.[33])

2.9 Power Supply

Pencatu daya atau pemasok daya adalah alat listrik yang memasok tenaga listrik ke suatu beban listrik. Fungsi utama catu daya adalah untuk mengubah arus listrik dari sumber menjadi tegangan, arus, dan frekuensi yang benar untuk memberi daya pada beban (load). Akibatnya, catu daya terkadang disebut sebagai konverter daya listrik. Beberapa catu daya adalah bagian peralatan mandiri yang terpisah, sementara yang lain dibuat ke dalam peralatan beban yang diberi daya. Contoh yang terakhir termasuk catu daya yang ditemukan di komputer desktop dan perangkat elektronik konsumen. Fungsi lain yang mungkin dilakukan oleh catu daya termasuk

membatasi arus yang ditarik oleh beban ke tingkat yang aman, mematikan arus jika terjadi kesalahan listrik, pengkondisian daya untuk mencegah derau elektronik atau lonjakan tegangan pada masukan mencapai beban, koreksi faktor-daya, dan menyimpan energi sehingga dapat terus memberi daya pada beban jika terjadi gangguan sementara pada sumber daya (pasokan daya tak terputus).

Semua catu daya memiliki sambungan masukan daya (power input), yang menerima energi dalam bentuk arus listrik dari suatu sumber, dan satu atau lebih sambungan keluaran daya (power output) yang menyalurkan arus ke beban. Sumber tenaga dapat berasal dari jejaring tenaga listrik, seperti outlet listrik, perangkat penyimpanan energi seperti baterai atau sel bahan bakar, pembangkit atau alternator, konverter tenaga surya, atau catu daya lainnya.[34]



Gambar 2. 15 Power Supply[35]

2.10 HMI (Human Machine Interface)

HMI (Human Machine Interface) adalah sistem yang menghubungkan antara manusia dan teknologi mesin. HMI dapat berupa pengendali dan visualisasi status baik dengan manual maupun melalui visualisasi komputer yang bersifat real time. Sistem HMI biasanya bekerja secara online dan real time dengan membaca data yang dikirimkan melalui I/O port yang digunakan oleh sistem controller-nya. Port yang biasanya digunakan untuk controller dan akan dibaca oleh HMI antara lain adalah port com, port USB, port RS232 dan ada pula yang menggunakan port serial. Tugas dari HMI (Human Machine Interface) yaitu membuat visualisasi dari teknologi atau sistem secara nyata. Sehingga dengan desain HMI dapat disesuaikan sehingga memudahkan pekerjaan fisik.

Tujuan dari HMI adalah untuk meningkatkan interaksi antara mesin dan operator melalui tampilan layar komputer dan memenuhi kebutuhan pengguna terhadap informasi sistem. HMI dalam industri manufacture berupa suatu tampilan GUI (Graphic User Interface) pada suatu tampilan layar komputer yang akan dihadapi oleh operator mesin maupun pengguna yang membutuhkan data kerja mesin. HMI terdapat berbagai macam visualisasi untuk Monitoring dan data mesin yang terhubung secara online dan real time.

HMI akan memberikan suatu gambaran kondisi mesin yang berupa peta mesin produksi dapat dilihat bagian mesin mana yang sedang bekerja. Pada HMI juga terdapat visualisasi pengendali mesin berupa tombol, slider, dan sebagainya yang dapat difungsikan untuk mengendalikan mesin sebagaimana mestinya. Selain itu dalam HMI juga ditampilkan alarm jika terjadi kondisi bahaya dalam sistem. Sebagai tambahan, HMI juga menampilkan data-data rangkuman kerja mesin termasuk secara grafik[36]



Gambar 2. 16 LCD Nextion[37]

2.11 Variabel speed drive atau variabel frekuensi

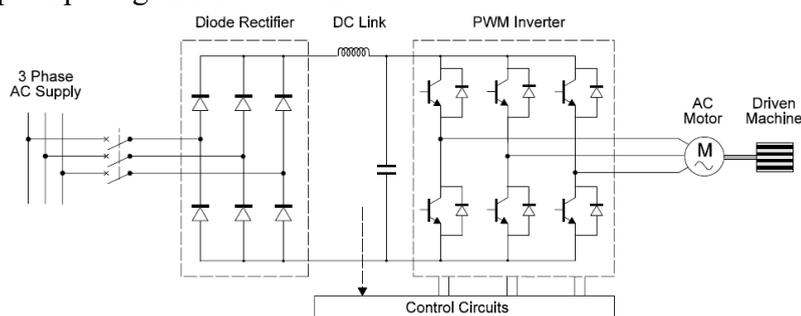
Variable speed drive atau variable frekuensi drive adalah suatu alat yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor listrik (AC) dengan mengontrol frekuensi daya listrik yang dipasok ke motor. Pada perangkat tersebut terdapat rectifier, inverter dan microcontroller. [38][39]

drive adalah suatu alat yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor listrik (AC) dengan mengontrol frekuensi daya listrik yang dipasok ke motor. Variabel frekuensi drive semakin populer karena kemampuannya untuk mengontrol kecepatan motor induksi. VSD mengontrol kecepatan motor induksi dengan

mengubah frekuensi dari grid untuk nilai disesuaikan pada sisi mesin sehingga memungkinkan motor listrik dengan cepat dan mudah menyesuaikan kecepatan dengan nilai yang diinginkan.

Dua fungsi utama dari variabel frekuensi drive adalah untuk melakukan konversi listrik dari satu frekuensi ke yang lain, dan untuk mengontrol frekuensi keluaran. Aplikasi VSD digunakan dari mulai peralatan kecil sampai peralatan besar, yaitu pengaturan pabrik tambang, kompresor dan sistem ventilasi untuk bangunan besar. Selain itu VSD juga digunakan pada pompa, konveyor dan alat pengendali mesin. Penggunaan variabel frekuensi drive pada motor dapat menghemat energi sehingga mengurangi biaya listrik.[38]

Bentuk rangkaian dari Variabel speed drive (VSD) terdiri dari beberapa bagian seperti rectifier, DC link, dan Inverter. Rangkaian dari Variabel speed drive (VSD) seperti pada gambar dibawah



Gambar 2. 17 Rangkaian Variable Speed Drive (VSD) [38]

A. Keuntungan Penggunaan Variable Speed Driver

1. Penggerak Kecepatan Variabel hemat energi. Efisiensi VSD yang beroperasi pada kecepatan variabel lebih tinggi dibandingkan dengan drive dc. Efisiensi drive akan berada di urutan 92-95%.
2. Respons dinamis VSD dibandingkan dengan drive dc yang mengarah ke kontrol yang lebih baik
3. Menggunakan VSD kita bisa mendapatkan rentang kecepatan, torsi, dan output daya yang luas yang membantu dalam mencapai kontrol sistem yang lebih baik. Karena rentang kontrol yang luas, VSD membantu meningkatkan kualitas sistem proses

4. Memulai Arus di VSD lebih sedikit dibandingkan dengan sistem penggerak dc konvensional
5. Efisiensi penggerak kecepatan variabel ditingkatkan dengan peningkatan faktor daya sistem penggerak[40]

B. Kerugian Penggunaan Variable Speed Driver

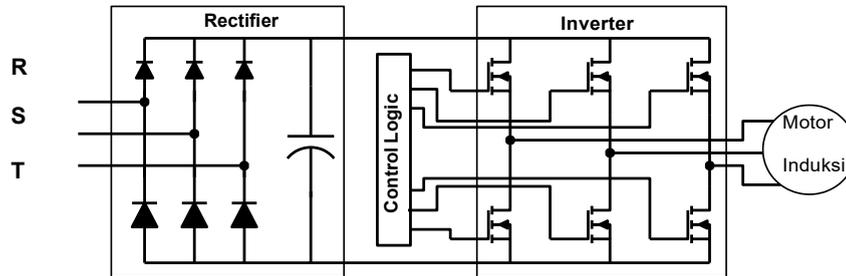
1. Memulai Arus di VSD lebih sedikit dibandingkan dengan sistem penggerak dc konvensional
2. Efisiensi penggerak kecepatan variabel ditingkatkan dengan peningkatan faktor daya sistem penggerak[40]

2.12 Prinsip Kerja Variable Speed Driver

Variable Speed Drive (VSD) adalah metode pengasutan yang memiliki konsep dasar mengubah sumber daya Arus bolak balik (AC) menjadi arus searah (DC) melalui penyearah yang dikontrol atau tidak dan kemudian diubah kembali menjadi AC untuk memberi tegangan pada motor yang dapat diatur besar frekuensinya. VSD ini memiliki 2 bagian utama yakni penyearah tegangan AC (50 atau 60 HZ) ke DC, dan bagian kedua yaitu membalikan dari arus searah (DC) ke tegangan AC dengan frekuensi yang diinginkan. Penggunaan inverter merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengubah daya arus searah menjadi arus bolak balik, sehingga frekuensi yang dihasilkan dapat diubah. Selain itu fungsi Inverter juga adalah untuk merubah kecepatan motor AC dengan cara merubah frekuensi outputnya. Perubahan frekuensi arus bolak balik dari inverter ditentukan oleh periode pulsa yang memacu penyearah yang digunakan. Dengan mempercepat atau memperlambat periode pulsa yang memicu thyristor, frekuensi dan juga kecepatan motor dapat diatur. [41]

Kecenderungan yang terjadi pada peralatan pengaturan kecepatan motor induksi mengakibatkan turunnya torsi motor induksi tersebut pada saat kecepatan rendah. Variable Speed Drive (VSD) adalah suatu peralatan pengendali motor induksi 3 fasa dengan prinsip mengatur besaran frekuensi dan tegangan yang diterima oleh motor induksi. Pengaturan frekuensi dan tegangan secara bersamaan

ini mengakibatkan kecepatan berubah dengan tetap menjaga torsi pada nilai konstan.



Gambar 2. 18 Diagram Variable Speed Drivers [41]

Gambar 2 menunjukkan bagian-bagian dari Variable Speed Drive Inverter yang memiliki prinsip kerja sebagai berikut:

- A. Tegangan listrik 3 fasa dari sumber disearahkan dengan rangkaian penyearah 3 fasa three Phase rectifier sehingga menghasilkan tegangan DC murni setelah melalui DC bus kapasitor.
- B. Tegangan DC tersebut digunakan sebagai sumber yang dialirkan menuju inverter melalui saklar- saklar daya 3 lengan yang sudah dikendalikan dengan control logic sehingga pada setiap saklar yang berada dalam satu lengan bekerja secara bergantian dan dengan saklar pada lengan yang lain saling bergeser 120° .
- C. Saklar daya berupa Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) yaitu suatu devais saklar semikonduktor yang mampu bekerja pada frekuensi relative tinggi dengan kemampuan melewatkan arus yang relatif besar jika dibandingkan dengan mosfet dan transistor biasa.[39]

2.13 Rectifier atau Penyearah

Rectifier (Penyearah Gelombang) adalah suatu bagian dari Rangkaian Catu Daya atau Power Supply yang berfungsi sebagai pengubah sinyal AC (Alternating Current) menjadi sinyal DC (Direct Current). Rangkaian Rectifier atau Penyearah Gelombang ini pada umumnya menggunakan Dioda sebagai Komponen Utamanya. Hal ini dikarenakan Dioda kjmemiliki karakteristik yang hanya melewatkan arus listrik ke satu arah dan menghambat arus listrik dari arah

sebaliknya. Jika sebuah Dioda dialiri arus Bolak-balik (AC), maka Dioda tersebut hanya akan melewatkan setengah gelombang, sedangkan setengah gelombangnya lagi diblokir/dipotong (tidak terlihat). [42]



Gambar 2. 19 Konsep Dasar Rectifier[42]