

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Seiring dengan semakin populernya penggunaan mobil listrik pada saat ini mengakibatkan banyak peneliti terus melakukan penelitiannya dalam rangka meningkatkan performa, efisiensi, optimasi dan lainnya untuk menciptakan mobil listrik yang jauh lebih baik. Berikut ini beberapa penelitian yang membahas mengenai *driver motor electric vehicle car* dan *power monitoring system* adalah sebagai berikut :

Pada penelitian yang dilakukan M Andri Zuman merancang sebuah prototipe mobil listrik menggunakan motor DC Permanen 0,37 HP (*horse power*). Dalam penelitian tersebut di dapat hasil bahwa penggunaan motor DC permanen memiliki beberapa kelebihan diantaranya memiliki torsi yang besar, kecepatan dapat dikontrol dengan mudah, kecepatan motor magnet permanen berbanding langsung dengan harga tegangan yang diberikan pada kumparan jangkar, arah arus putaran motor dc magnet permanen ditentukan oleh arah arus yang mengalir pada kumparan jangkar (*armature*), ukuran motor dc permanen lebih kecil dan lebih ringan apabila dibandingkan dengan motor dc jenis lainnya untuk HP yang sama, namun Zuman, M Andri berpendapat bahwa penggunaan motor DC permanen dalam mobil listrik belum layak dianggap sebagai mobil listrik yang kompleks sehingga pengembangan riset mobil listrik diharapkan akan terus dilakukan untuk dapat mewujudkan suatu mobil listrik yang lebih baik dalam hal tenaga, dan kecepatannya[1].

Kemudian pada penelitian yang dilakukan oleh Rangga Jaya Andika, dkk yaitu merancang sebuah *driver motor* 3 fasa untuk mengendalikan kecepatan motor BLDC menggunakan Teknik PWM pada mobil listrik. Pada *driver motor* yang dibuat menggunakan MOSFET *N-Channel* sebagai *switching*. Rangga Jaya Andika, dkk berpendapat bahwa penggunaan MOSFET mempunyai rugi-rugi daya akibat proses pensaklaran lebih kecil dibandingkan dengan jenis transistor yang lain. *Controller* ini menggunakan MOSFET IRF3205, serta menggunakan MOSFET

gate driver berjenis L293D. Dalam pengujian yang telah Rangga Jaya Andika, dkk lakukan dengan menggunakan metode PWM *six-step* mampu menjalankan motor BLDC 3 fase dengan tegangan mencapai 12V dengan arus mencapai 20A dan frekuensi 20 – 60 Hz[3].

Pada penelitian yang Ridwan, Muhammad Taufik lakukan yaitu merancang sebuah *driver motor controller brushless* (BLDC) dengan kapasitas 350W / 48V. Dalam penelitian tersebut menggunakan TLP250 yaitu MOSFET *gate driver* yang berjenis *isolated gate*. MOSFET ini memiliki kelebihan yaitu PWM yang digunakan dapat mencapai nilai 100% hal yang tidak dimiliki pada MOSFET *gate driver* berjenis *non isolated gate*. Kelemahannya yaitu rangkaian yang dibuat lebih banyak karena diperlukan rangkaian yang memisahkan antara *ground IC (Integrated Circuit)* tersebut dan *ground* dari baterai motor. Dalam penelitian tersebut berhasil menjalankan sebuah motor BLDC dengan tegangan 48V mencapai arus 7.2A dengan PWM 100%. Pada penelitian tersebut didapat bahwa hasil putaran motor hanya mampu mencapai 425 rpm dengan nilai PWM sebesar 40%, hal tersebut dikarenakan pemberian setting waktu dari program mikrokontroler yang tidak tepat, sehingga ketika nilai PWM berada diatas 40% putaran motor menjadi berat untuk berputar (patah-patah). Pada penelitian tersebut didapat kesimpulan bahwa semakin cepat putaran pada motor *brushless DC*, maka semakin cepat juga perubahan *switching* atau penyakelaran pada MOSFET IRF540N yang diatur oleh PWM pada mikrokontroler[4].

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Julirdi Arif yaitu merancang *Electric Car Smart Power System* pada prototipe mobil listrik Raden Intan. Pada penelitian tersebut Julirdi Arif berhasil membuat suatu sistem yang dapat menyimpan data-data hasil pengukuran dari *driver* motor yang dibuat ke dalam micro sd menggunakan modul *micro SD*. Data-data yang diukur diantaranya yaitu arus, tegangan baterai serta kecepatan dari mobil listrik. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dengan menggunakan metode tersebut berhasil menghemat energi sebesar 20609,14 Joule dengan total penggunaan energi setelah penerapan sebesar 30822,07 joule dengan kalkulasi jarak maksimal sejauh 116,79 Km[5].

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya maka peneliti mencoba untuk membuat sebuah sistem yang lebih optimal dan efisien dari penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Berikut ini tabel perbandingan dari penelitian-penelitian yang sudah ada sebelumnya dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian

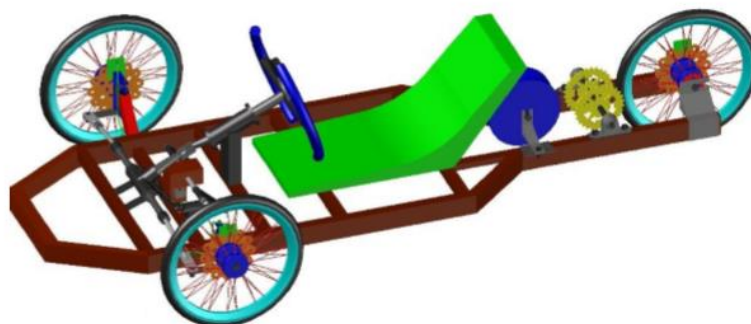
| No | Nama | Judul Penelitian | Hal yang dibahas |
|----|-------------------------------|--|---|
| 1 | Zuman M Andri | Prototipe Mobil Listrik dengan Menggunakan Motor DC Magnet Permanen 0,37 HP | - Merancang bangun prototipe mobil listrik menggunakan motor DC permanen |
| 2 | Rangga Jaya Andika | Perancangan dan Implementasi <i>Driver</i> Motor Tiga Fasa untuk Pengendali Kecepatan Motor BLDC Berbasis PWM pada Mobil Listrik | - Bagaiman membuat rangkaian <i>driver</i> motor tiga fasa untuk mengendalikan motor BLDC menggunakan PWM |
| 3 | Muhammad Ridwan Taufik | Rancang Bangun Penggerak Daya Motor Brushless DC 350W/48V | - Merancang <i>driver</i> motor <i>brushless</i> DC 350W/48V - Menganalisa hasil pembuatan <i>driver</i> motor yang dibuat |
| 4 | Arif Juliardi | Electric Car Smart Power Sistem pada <i>Prototype</i> Mobil Listrik Raden Intan | - Merancang <i>Smart Power System</i> menggunakan modul micro SD untuk menyimpan data hasil pengukuran pada sensor yang digunakan |
| 5 | Dhiya Uddin Rijalusalam | Perancangan <i>Driver</i> Motor Controller BLDC pada Electric Vehicle Car 48V Dengan Power Monitoring Sistem Berbasis Telemetry | - Merancang sistem <i>driver</i> motor BLDC 48V yang didalamnya terdapat fungsi <i>power monitoring system</i> dan <i>telemetry</i> untuk mempermudah proses monitoring penggunaan energi pada mobil listrik. |

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Mobil Listrik

Mobil Listrik adalah mobil yang di gerakan oleh satu atau lebih motor listrik, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai yang dapat diisi ulang atau perangkat penyimpanan energi lainnya. Motor listrik memberi mobil listrik torsi yang instan, serta menciptakan akselerasi yang kuat dan halus. Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan yang potensial jika dibandingkan dengan mobil bermesin pembakaran biasa diantaranya, mobil listrik tidak menghasilkan gas emisi hasil pembakaran kendaraan bermotor. Selain itu juga mobil listrik dapat mengurangi emisi gas rumah kaca karena tidak membutuhkan bahan bakar fosil sebagai penggerak utamanya.

Sampai saat ini banyak penliti terus melakukan penelitiannya dalam rangka meningkatkan performa, efisiensi, optimasi dan lainnya untuk menciptakan mobil listrik yang jauh lebih baik. Pemerintah Indonesia sendiri melalui Kementrian Riset, Teknolgoi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia(RISTEKDIKTI) ikut berpartisi dalam mengembangkan minat mahasiswa dalam bidang mobil listrik dengan menyelenggarakan Kontes Mobil Hemat Energi (KMHE). Salah satu kategori yang diperlombakan yaitu mobil *prototype*. Mobil *prototype* merupakan kendaraan roda tiga untuk kendaraan masa depan aerodinamis. Berikut ini gambaran dari desain mobil prototype dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Desain Prototipe Mobil Listrik

Sumber : Purnomo Sigit J. Uji Eksperimental kinerja mobil listrik (176098 – ID Uji eksperimen [23])

Pada prototype mobil listrik terdapat beberapa peralatan pendukung yang diperlukan yaitu sebagai berikut.

1. Motor Listrik

Motor listrik merupakan *device* yang bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi gerak atau mekanik yang digunakan untuk memutar roda. Pada penggunaannya motor listrik memiliki keunggulan dibandingkan dengan motor bahan bakar antara lain tidak menimbulkan efek kebisingan, kecepatan putaran motor mudah untuk diatur, dan lebih mudah dalam perawatannya.

2. *Throttle Speed Control*

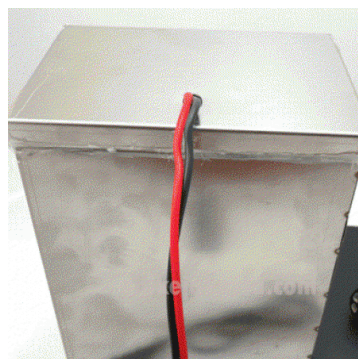
Throttle speed control merupakan alat yang digunakan untuk mengatur kecepatan putaran motor. Pada dasarnya *throttle* bekerja mirip seperti potensiometer. *Throttle* memiliki 3 buah kabel yang terdiri dari VCC, data, GND. Nilai resistansi pada pin data *throttle* akan berubah sesuai dengan putaran dari *throttle*. Perubahan nilai resistansi tersebut akan menyebabkan perubahan nilai tegangan pada pin data. Perubahan tegangan ini nantinya digunakan sebagai masukan ADC pada mikrokontroler untuk mengatur kecepatan putaran motor. Fungsi *throttle* ini sama halnya dengan fungsi pedal gas yang ada pada kendaraan pada umumnya, perbedaannya *throttle* bekerja secara electric. Berikut ini gambaran *throttle* dapat dilihat pada gambar 2.2



Gambar 2. 2 Bentuk Fisik *Throttle Speed Control*

3. Baterai

Baterai merupakan *power supply* yang digunakan untuk energi penggerak motor. Pada *prototype* nilai tegangan baterai yang digunakan berbeda-beda sesuai dengan spesifikasi motor yang digunakan. Pada *prototype* mobil listrik jenis baterai yang digunakan menggunakan baterai sekunder atau rechargeable sehingga saat baterai habis dapat di *charger* kembali. Berikut gambar dari baterai yang umum digunakan pada *prototype* mobil listrik dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2. 3 Baterai LifePO4 48V 20Ah

2.2.2 Motor Brushless DC (BLDC)

2.2.2.1 Pengertian Motor BLDC

Motor BLDC atau biasa disebut motor *brushless* (tanpa sikat) DC merupakan salah satu jenis motor sinkron magnet permanen yang disuplai oleh sumber listrik DC pada kontrolnya, dan membutuhkan sumber listrik AC tiga fase untuk menggerakkan bagian rotor motornya. Jenis motor ini membutuhkan sumber listrik AC tiga fase karena motor BLDC ini memiliki 3 buah koil pada stator, kemudian hubungan antara koil dan belitan stator *trapezoidal* akan memberikan *electro motive back trapezoidal* (gaya gerak listrik balik *trapezoidal*) yaitu tegangan balik yang dihasilkan oleh belitar motor BLDC yang akan menggerakkan rotor. Pergerakan pada rotor ini disebabkan oleh medan magnet pada stator yang pada setiap saatnya hanya dua fase yang tersuplai sementara satu fase lainnya tidak tersuplai. Fenomena ini mengakibatkan motor ini seperti motor DC, karena arus yang mengalir pada kumparan stator mirip dengan motor DC, meskipun motor ini sebenarnya dialiri dengan tiga fase[4].

Motor BLDC menggunakan sistem komutasi elektrik atau sering disebut *electronically commutated motor*. 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 penyalan, dan dapat mengaktifkan koil dengan waktu yang tepat sehingga dapat menggerakkan motor[4]. Berikut ini merupakan bentuk fisik dari motor BLDC 3 fase dapat dilihat pada gambar 2.4



Gambar 2. 4 Bentuk Fisik Motor BLDC 3 Fase

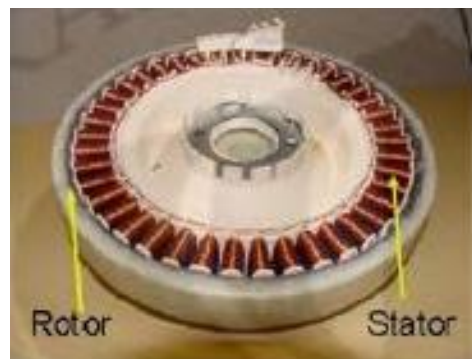
Motor BLDC terdiri dari 3 jenis motor berdasarkan banyaknya fase antara lain motor BLDC 1 fase, 2 fase dan 3 fase. Mengacu pada jenisnya, stator pada motor BLDC memiliki jumlah yang sama dengan belitannya. Motor BLDC yang sering digunakan adalah motor BLDC 3 fase[1].

Jenis motor ini memiliki biaya dan perawatan yang lebih mudah, kecepatan yang tinggi serta memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan motor DC (*Direct Current*). Hal ini disebabkan karena pada konstruksi motor BLDC tidak memiliki sikat sehingga mengurangi bagian yang bias aus atau rusak dan perlu diganti. Oleh karena tidak adanya *brush* (sikat), untuk menentukan timing komutasi yang tepat diperlukan 3 buah hall sensor atau bias menggunakan sebuah encoder untuk mendapatkan torsi dan kecepatan yang konstan. Pada *hall sensor*, timing komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan 3 buah *hall sensor* untuk mendapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda[1].

2.2.1.2 Bagian-bagian Motor BLDC

1. Stator

Stator merupakan bagian yang diam atau bersifat statis pada motor yang berfungsi sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada motor sehingga motor dapat berputar. Pada motor BLDC terdiri dari 3 atau lebih belitan (electromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor BLDC terhubung dengan tiga buah kabel. Masing-masing kabel mewakili fase yang dihubungkan pada rangkaian control. Pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen[1]. Berikut ini bentuk fisik dari stator dan rotor pada motor BLDC dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Bentuk Fisik dari Stator dan Rotor pada Motor BLDC

Sumber : <http://coretannurhakim.blogspot.com/2016/06/penerapan-motor-brushless-dc-blcd-motor.html>

Belitan stator pada motor BLDC terdiri dari dua jenis yaitu belitan stator jenis sinusoidal dan belitan stator jenis *trapezoidal*. Perbedaan kedua jenis belitan tersebut terletak pada hubungan antara koil dan belitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (*Electro Motive Force*) atau gaya gerak listrik yang berbeda[1].

EMF balik atau gaya gerak listrik balik merupakan tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC ketika motor BLDC berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber. Besarnya EMF balik dipengaruhi oleh kecepatan sudut putaran motor (ω), medan magnet rotor (B), dan banyaknya lilitan pada belitan

stator (N) sehingga besarnya EMF balik dapat dihitung dengan persamaan 1 berikut [1] :

$$\text{Back EMF} = B \cdot N \cdot l \cdot r \cdot \omega \dots\dots\dots(1)$$

Dimana :

B = Kerapatan medan magnet yang dihasilkan rotor (Tesla)

N = Banyaknya lilitan pada belitan stator setiap fase

l = Panjang batang rotor (m)

r = Jari-jari dalam motor (m)

ω = Kecepatan sudut putaran motor (rad)

Ketika motor BLDC sudah dibuat pada jumlah lilitan stator dan besarnya medan magnet konstan, sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor. Semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan maka semakin besar EMF balik yang dihasilkan oleh motor. Perubahan besarnya EMF balik akan mempengaruhi torsi motor BLDC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan melebihi kecepatan rata-rata maka akan mengakibatkan EMF balik yang dihasilkan oleh motor lebih besar daripada tegangan potensial pada belitan stator. Hal ini menyebabkan arus dan torsi menjadi turun. Hal tersebut sesuai dengan persamaan 2,3, dan 4 sebagai berikut [1]:

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_a \text{ (Nm)} \dots\dots\dots(2)$$

Atau

$$T = \left(\frac{Kg}{s}\right) \text{ (Nm)} \dots\dots\dots(3)$$

Atau

$$T = \frac{P}{n \cdot 2\pi \cdot 60} \text{ (Nm)} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana :

T = Torsi motor (Nm)

K = Konstanta Persamaan

Φ = Fluks magnet (Tesla)

I_a = Arus jangkar (Ampere)

K_g = Berat Beban/ Massa (Kg)

s = Kecepatan (m/s)

P = daya Motor (Watt)

n = Putaran Motor (Rpm)

2π = Omega (ω)

2. Rotor

Rotor merupakan bagian penting pada motor yang berfungsi untuk menghasilkan putaran pada motor. Perputaran tersebut terjadi akibat adanya gaya elektromagnetik yang dihasilkan oleh stator sesuai dengan persamaan 5 berikut ini [4].

$$n = \frac{V - (I_a \cdot R_a)}{K \cdot \Phi} \text{ (Rpm)} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana :

n = Putaran Motor (Rpm)

V = Tegangan Kerja Motor (Volt)

I_a = Arus Jangkar (A)

R_a = Tahanan Jangkar (Ohm)

K = Konstanta Motor

Φ = Fluks Medan Magnet (Wb)

Rotor pada motor BLDC berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional. Pada motor BLDC rotor tersusun dari 1 buah electromagnet yang berada diantara *brushes* sikat) yang terhubung pada 2 buah elektroda yang terangkai ke sumber DC. Pada motor BLDC bagian rotor tersusun dari 2 atau lebih pasang kutup magnet permanen berbentuk persegi Panjang yang saling direkatkan dan tidak memiliki sikat.

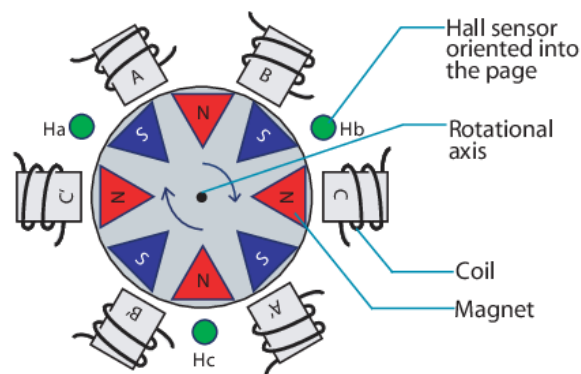
3. Sensor Hall

Sensor Efek Hall dirancang untuk merasakan adanya objek magnetis ketika ada perubahan posisi. Perubahan medan magnet yang terus menerus

menyebabkan timbulnya frekuensi pulsa tertentu. Sensor jenis ini biasa digunakan untuk mendeteksi kecepatan [22].

Sensor hall BLDC merupakan sensor yang berada pada motor BLDC, berfungsi untuk memberikan *feedback* (umpan balik) pada rangkaian control yang bersifat elektronik. Umpan balik ini berfungsi untuk mengendalikan perubahan komutasi pada motor BLDC. Hal ini diperlukan karena Pada motor BLDC bagian stator harus diberikan sinyal sesuai dengan perubahan komutasinya. Untuk itu diperlukan sensor yang dapat mendeteksi bagian koil atau fase pada rotor yang telah diberikan sinyal oleh fluks magnet. Saat rotor berputar, perubahan besar medan magnet antara magnet permanen dan gaya elektromagnetik dari lilitan kawat akan dideteksi oleh sensor hall sebagai masukan dari controller [1].

Dalam pemasangannya sensor hall ditempatkan setiap 120 derajat pada jarak antar kutub stator. Hal ini bertujuan agar hasil deteksi terhadap vector fluks stator dapat diukur secara akurat. Berikut gambaran dari pemasangan sensor hall berdasarkan jumlah pasangan pole pada motor BLDC dapat dilihat pada gambar 2.6



Gambar 2. 6 Posisi Penempatan Sensor Hall

(Sumber : <https://www.semanticscholar.org/paper/Position-estimation-and-control-of-compact-BLDC-on-Simpkins-Todorov>)

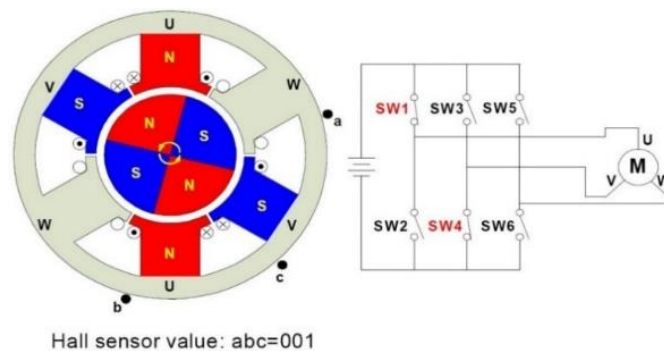
2.2.1.3. Sistem Komutasi pada BLDC Motor

Berbeda dengan motor listrik DC konvensional, sistem komutasi dari motor BLDC diatur secara elektronik karena lilitan kawat pada stator harus

dinyalakan-dimatikan (on-off) secara berurutan dan teratur. Oleh karena itu dibutuhkan sensor yang dapat memberikan informasi secara presisi kepada controller untuk mengatur lilitan mana yang harus dialiri listrik. Berikut ini merupakan tabel informasi perubahan komutasi motor berdasarkan nilai sensor hall dapat dilihat pada tabel 2.2 dan gambar 2.5 [1].

Tabel 2. 2 Perubahan Komutasi Sensor Hall

| Hall Sensor Value | Phases | Switches |
|-------------------|--------|-----------|
| 101 | U-V | SW1 , SW4 |
| 001 | U-W | SW1 , SW6 |
| 011 | V-W | SW3 , SW6 |
| 010 | V-U | SW3 , SW2 |
| 110 | W-U | SW5 , SW2 |
| 100 | W-V | SW5 , SW4 |



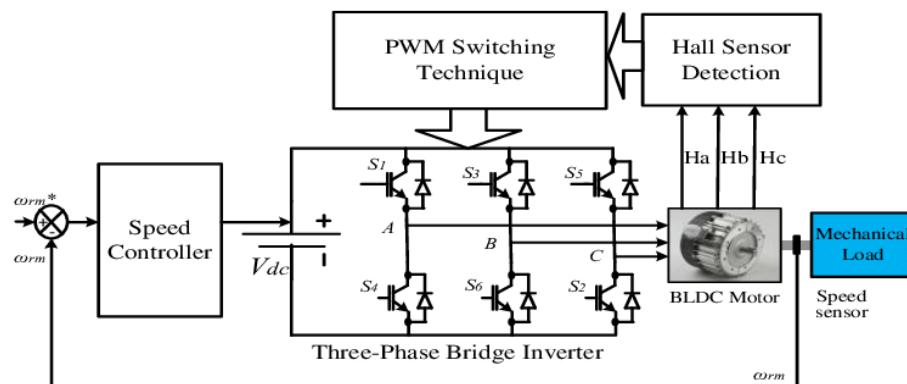
Gambar 2. 7 Perubahan Komutasi Step 1 dan Step 2

Sumber : <https://www.pembangkitlistrik.com/desain-kontrol-pfc-untuk-motor-brushless-dc/>

Pada motor BLDC menggunakan tiga buah *hall sensor* yang dipasang dengan jarak 120° pada stator untuk mendeteksi bagian rotor mana yang akan terkena fluks magnet. Saat rotor berputar, maka perubahan besar medan magnet antara magnet permanen dan gaya elektromagnetik dari lilitan kawat akan dideteksi oleh *hall sensor* sebagai masukan controller, sehingga proses komutasi dapat berjalan secara simultan dan kontinyu.

2.2.1.3 Rangkaian Kontroler dan Driver

Kontroler pada motor BLDC berfungsi sebagai pengatur proses komutasi, ketika controller mendapat pulsa masukan dari *input hall sensor*, kemudian masukan akan diproses oleh kontroler untuk menentukan lilitan mana yang harus dialiri listrik agar motor dapat berputar. Kegunaan lain dari kontroler yaitu sebagai pengatur tegangan *input* pada motor, sehingga kecepatan putar motor dapat berubah-ubah sesuai yang diinginkan. *Driver* sendiri merupakan rangkaian yang berada di dalam kendali kontroler yang berfungsi sebagai pembantu kontroler dalam proses komutasi[9]. Berikut ini gambaran diagram blok dari sistem control motor BLDC dapat dilihat pada gambar 2.5.



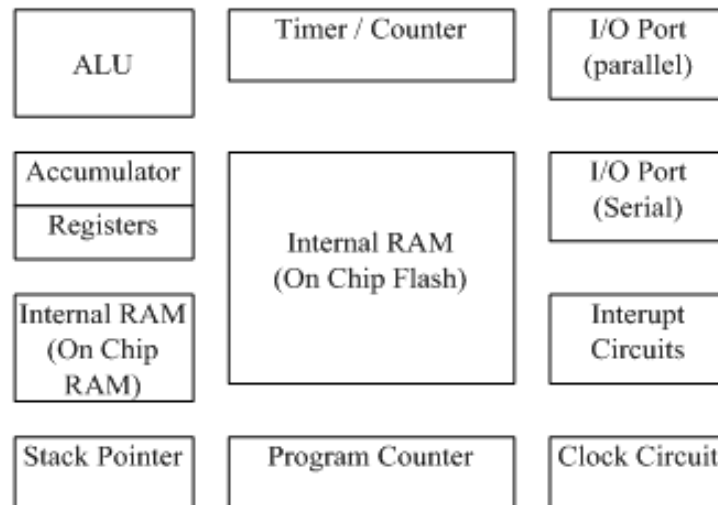
Gambar 2. 8 Skema Rangkaian Kontroler BLDC

(Yasien, 2018)

2.2.3 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah sistem mikroprosesor dimana didalamnya sudah terdapat *Central Processing Unit (CPU)*, *Read Only Memory (ROM)*, *Random Access Memory (RAM)*, *Input-Output*, *timer*, *interrupt*, *clock* dan peralatan internal lainnya yang sudah saling terhubung dan terorganisir dengan baik dalam satu chip yang siap dipakai [10]. Sinyal *input* mikrokontroler berasal dari sensor yang merupakan informasi dari lingkungan sedangkan sinyal *output* ditujukan kepada aktuator yang dapat memberikan efek ke lingkungan. Secara sederhana mikrokontroler dapat diibaratkan sebagai otak dari suatu perangkat/produk yang mampu berinteraksi dengan lingkungan sekitarnya. Berikut

ini gambaran dari arsitektur mikrokontroler dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2. 9 Arsitektur Mikrokontroler

Sumber : <http://perikecilious.blogspot.com/2016/01/modul-pembelajaran-i-arsitektur.html>

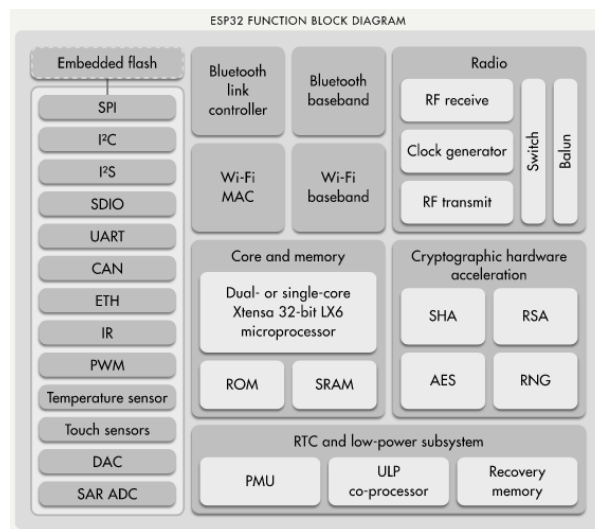
2.2.3.1 ESP32

ESP32 merupakan sebuah chip yang dibuat oleh *Espressif Sistem*. ESP32 merupakan chip (SOC) berdaya rendah dengan Wi-Fi dan kemampuan Bluetooth dua mode dengan inti *Tensilica Xtensa LX6 dual core* dengan *clock rate* 240Mhz. ESP32 sudah terintegrasi dengan built-in antenna switches, *RF balun, power amplifier, low noise receive amplifier, filter and power management modules*. ESP32 bekerja dengan konsumsi daya rendah melalui fitur hemat daya termasuk *fine resolution clock gating, multiple power modes, and dynamic power scaling*. Module ESP32 merupakan generasi penerus dari module ESP8266 yang cukup populer untuk aplikasi IoT. Pada ESP32 terdapat inti CPU seperti Wifi yang lebih cepat, GPIO yang lebih banyak dan mendukung *Bluetooth Low Energy*. Berikut ini merupakan spesifikasi dari mikrokontroler ESP32 dapat dilihat pada tabel 2.1 [6].

Tabel 2. 3 Spesifikasi IC ESP32

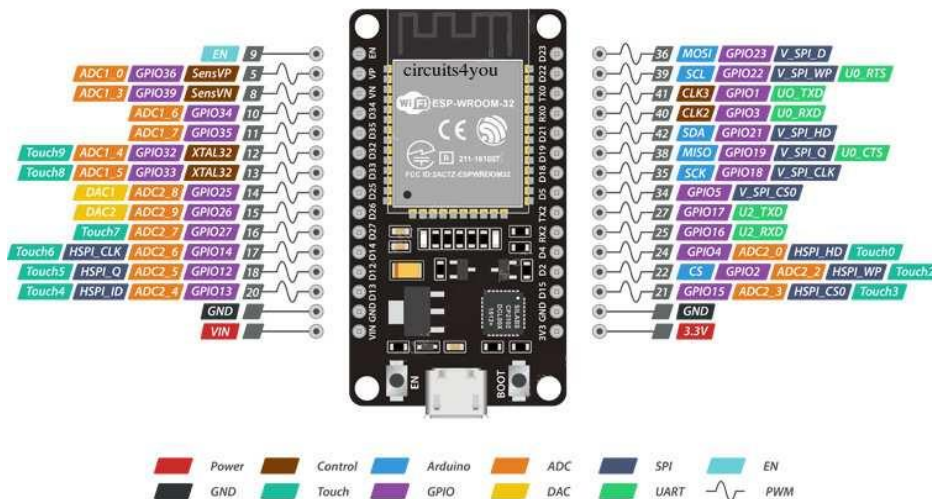
| | |
|-------------------------|--|
| MCU | Xtensa Dual Core 32 Bit LX6 600 DMIPS |
| Wi-Fi | 802.11 b/g/n tipe HT40 |
| Bluetooth | Tipe 4.2 dan BLE |
| Typical Frequency | 160 Mhz |
| SRAM | 512 Kb |
| Flash | SPI Flash, Up to 16 Mb |
| Total GPIO | 36 |
| PWM Pin / Bit | 16 Pin / 10 Bit |
| SPI / I2C / I2CS / UART | 4 / 2 / 2 / 2 |
| ADC | 12 Bit |
| CAN | 1 |
| Touch Sensor | Yes |
| Temperature Sensor | Yes |
| Suhu Kerja | -40 – 125 C |

Berikut ini merupakan arsitektur dari IC Chip ESP32 dan konfigurasi pin dari modul ESP32 dapat dilihat pada gambar 2.10 dan gambar 2.11 sebagai berikut :



Gambar 2. 10 Arsitektur Chip ESP32

<https://www.edukasiElektronika.com/2019/07/arsitektur-dan-fitur-esp32-module-esp32.html>



Gambar 2. 11 Konfigurasi Pin Module ESP32

<https://www.edukasielatronika.com/2019/07/arsitektur-dan-fitur-esp32-module-esp32.html>

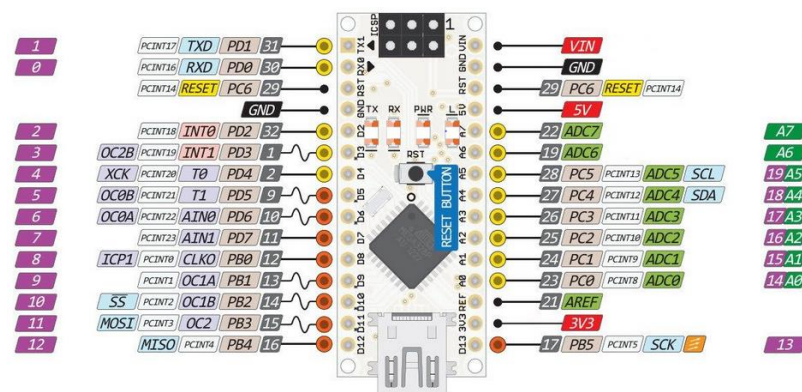
2.2.3.2 Arduino Nano

Arduino Nano adalah salah satu papan pengembangan mikrokontroler yang berukuran kecil, lengkap dan mendukung penggunaan breadboard. Arduino Nano diciptakan dengan basis mikrokontroler ATmega328. Arduino Nano kurang lebih memiliki fungsi yang sama dengan modul Arduino pada umumnya. Arduino Nano tidak menyertakan colokan DC berjenis *Barrel Jack*, dan dihubungkan ke komputer menggunakan port USB Mini-B. Arduino Nano dirancang dan diproduksi oleh perusahaan Gravitech. Berikut ini spesifikasi dan konfigurasi pin dari Arduino Nano dapat dilihat pada tabel 2.4 dan gambar 2.12 sebagai berikut [7].

Tabel 2. 4 Spesifikasi Arduino Nano

| | |
|-----------------------------|---------------|
| Mikrokontroler | Atmel 328 |
| Tegangan Operasi | 5V |
| <i>Input Recommendation</i> | Voltage 7-12V |
| <i>Input Voltage Limit</i> | 6-20V |
| Pin Digital I/O | 14 pins |
| Pins <i>Input</i> Analog | 8 pins |

| | |
|-----------------|------------------|
| Arus DC per I/O | 40 mA |
| Flash Memory | 32 KB |
| SRAM | 2 KB |
| EEPROM | 1 KB |
| Clock Speed | 16 Mhz |
| Ukuran | 1.85 cm x 4.3 cm |



Gambar 2. 12 Konfigurasi Pin Arduino Nano

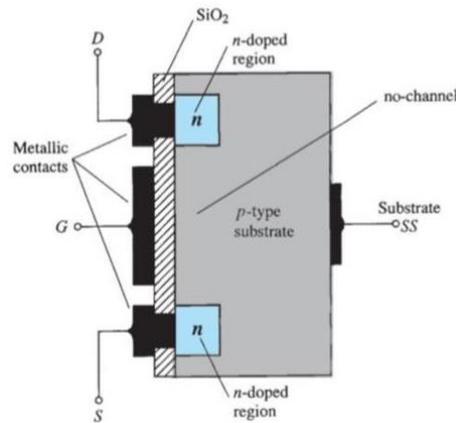
Sumber : <https://sunupradana.info/pe/2019/05/>

2.2.4 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

MOSFET merupakan salah satu jenis FET (*Field Effect Transistor*) atau transistor efek medan. Dalam keluarga *transistor* terdapat beberapa jenis diantaranya yaitu JFET (*Junction Field Effect Transistor*) dan IGFET/ MOSFET. Secara umum kedua jenis transistor ini memiliki fungsi yang sama namun memiliki kelebihan dan kekurangan sesuai spesifikasi masing-masing.

MOSFET memiliki 3 atau 4 buah kaki konduktor, yaitu kaki pertama atau ujung atas dinamakan *drain*, kaki kedua ujung bawah dinamakan *source*, dan kaki ketiga dinamakan *gate*. *Gate* biasanya memiliki 1 atau dua buah kaki. Pada kedua sisi kiri dan kanan terdapat implant semikonduktor yang berbeda tipe bahan. Terminal kedua sisi implant ini terhubung satu dengan yang lainnya secara internal dan dinamakan *gate*, karena *gate* pada MOSFET diisolasi oleh bahan metal oksida. *Gate* sendiri terbuat dari bahan metal seperti aluminium. Oleh karena itu transistor

efek medan ini dinamakan *metal oxide semiconductor*[4]. Berikut gambaran struktur pada bagian dalam MOSFET dapat dilihat pada gambar 2.13



Gambar 2. 13 Struktur Penyusun MOSFET

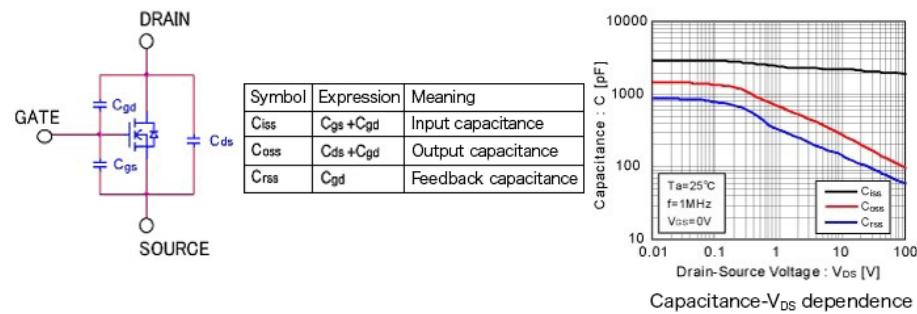
Sumber : <https://docplayer.info/42196915-Kata-pengantar-depok-9-februari-penyusun.html>

Secara umum MOSFET memiliki beberapa kelebihan apabila dibandingkan dengan komponen yang lainnya seperti IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dan BJT (*Bipolar Junction Transistor*) yaitu sebagai berikut [8]:

1. Tahanan gerbang sangat tinggi sehingga membutuhkan daya listrik *driver* yang rendah
2. Memiliki Tahanan ON ($R_{ds\ ON}$) sangat rendah, sehingga rugi-rugi daya pada kontak Drain-Source juga sangat rendah, hal ini menyebabkan temperature kerja menjadi lebih rendah.
3. Memiliki frekuensi switching yang tinggi, hal ini menyebabkan MOSFET sangat cocok bekerja pada *switching* frekuensi yang tinggi.

2.2.5 MOSFET Gate Driver

MOSFET *gate driver* merupakan rangkaian penguat daya yang menerima *input* daya rendah dari IC / mikrokontroler dan menghasilkan penguatan drive gerbang arus tinggi yang sesuai dengan MOSFET. Kaki *gate* pada sebuah MOSFET membutuhkan jumlah muatan yang relative besar untuk mengaktifkan MOSFET ke kondisi ON dan mematikan MOSFET ke kondisi OFF[11]. Hal yang perlu diketahui dalam konstruksi sebuah MOSFET pada kaki *gate-source* memiliki nilai kapasitansi. Penjelasan dapat dilihat pada gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8 *Gate-Source Capacitance* pada Konstruksi Penyusun MOSFET

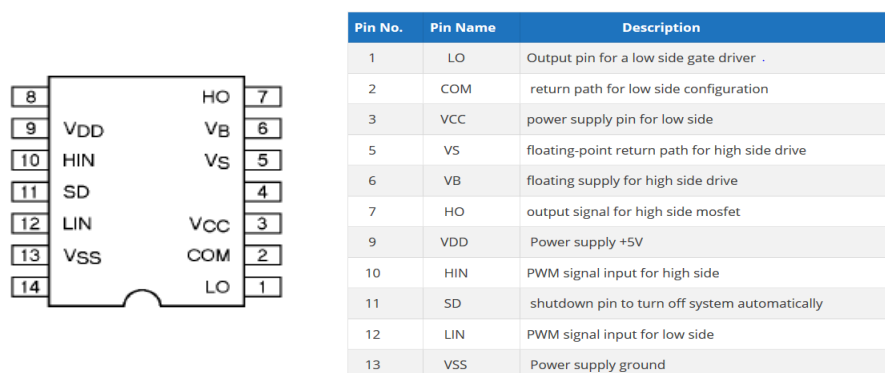
Sumber : <https://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/si/s-si/03-s-si/4873>

Dari gambar 2.8 di atas, Untuk mengisi daya kapastansi dengan cepat saat menggunakan pulsa PWM diperlukan arus pengisian / pengosongan beberapa ampere. Sedangkan *output* dari mikrokontroler biasanya hanya memiliki nilai yang kecil. Sehingga diperlukan IC khusus yang mampu menyediakan arus yang besar untuk mengaktifkan dan mematikan MOSFET[12]. Tanpa IC *gate driver* maka akan membutuhkan waktu lebih lama untuk mengaktifkan dan mematikan MOSFET sepenuhnya, sehingga akan menjatuhkan tegangan yang cukup besar saat arus besar mengalir yang membuat MOSFET menjadi panas. Oleh karena, untuk mengaktifkan dan mematikan sebuah MOSFET dalam periode yang cepat diperlukan sebuah IC *gate driver* . Pada penelitian IC *gate driver* yang digunakan adalah IR2110

2.2.5 1 IC Gate Driver IR2110

Salah satu IC yang dapat digunakan sebagai *gate driver* adalah IR2110. IR2110 mengendalikan sepasang MOSFET dalam setiap fase pada inverter fase sisi tinggi dan sisi rendah. IR2110 dipilih karena mempunyai kemampuan bekerja pada operasi *bootstrap*. Jika digunakan MOSFET dengan jenis *N-Channel* pada satu fase sisi tinggi dan rendah, diperlukan *floating ground* untuk mengendalikan MOSFET sisi tinggi. Hal ini disebabkan karena pada kaki source MOSFET sisi atas tidak terhubung dengan *ground* sistem. Untuk melakukan hal ini IR2110 memerlukan kapasitor *bootstrap* sebagai catu daya *floating* yang dipasang pada sisi keluaran IR2110.

IR2110 dapat digunakan untuk mengendalikan sepasang MOSFET yang bekerja pada tegangan mencapai 600V. Catu daya untuk tegangan *gate* berkisar antara 10V – 20V. IR2110 menerima tegangan logika pensaklaran dari 3.3V – 20V. IR2110 memiliki 14 pin, tidak semua pin digunakan dalam rangkaian penggerak. Keluaran IR2110 dikendalikan oleh tegangan masukan yang terdiri dari HIN (*High Input*) dan LIN (*Low Input*), dan SD (*Shutdown*). Masukan HIN dan LIN adalah sinyal digital, atau PWM mikrokontroler, sedangkan SD adalah nilai logika yang berfungsi untuk mengaktifkan dan menonaktifkan keluaran IR2110 yaitu HO (*High Output*) dan LO (*Low Output*). Tegangan maksimal keluaran HO dan LO besarnya sama dengan tegangan pada VCC. Berikut ini merupakan konfigurasi pin IR2110 beserta fungsinya dapat dilihat pada gambar 2.14 sebagai berikut

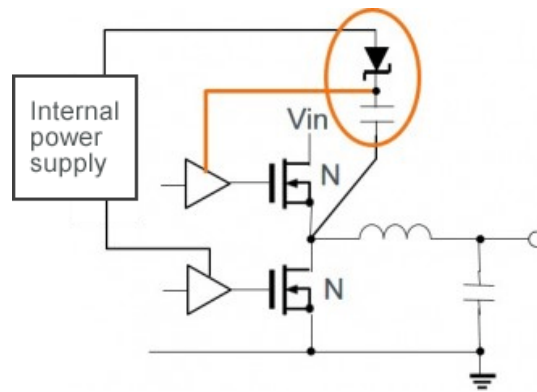


Gambar 2. 14 (a) Konfigurasi Pin IR2110 (b) Fungsi Pin IR2110

Sumber : <https://microcontrollerslab.com/MOSFET-driver-ir2110-pinout-examples-applications-datasheet/>

2.2.6 Rangkaian Bootstrap Capacitor

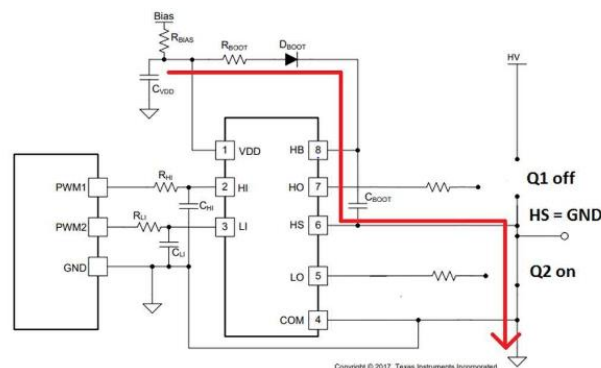
Rangkaian *bootstrap* dibutuhkan saat MOSFET *N-Channel* digunakan pada sisi tinggi pada suatu rangkaian daya. MOSFET *P-Channel* pada umumnya memiliki nilai $R_{ds\ on}$ yang lebih besar dibandingkan dengan MOSFET *N-Channel* pada rentang harga yang sama. Oleh karena itu untuk menurunkan biaya produksi *N-Channel* MOSFET digunakan pada sisi tinggi dalam suatu rangkaian. Berikut ini merupakan gambaran dari suatu rangkaian *bootstrap* kapasitor dapat dilihat pada gambar 2.15[16].



Gambar 2. 15 Rangkaian Bootstrap Capacitor

Sumber : https://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/dcdc/dcdc_sr/dcdc_sr01/829

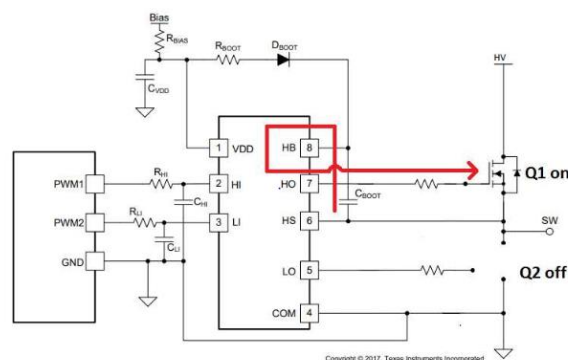
MOSFET *N-Channel* membutuhkan tegangan positif pada kaki *gate* terhadap *source* yang lebih besar dari tegangan threshold ($V_{gs} > V_{th}$) untuk dapat membuat MOSFET menjadi kondisi ON. Oleh karena itu pada konfigurasi ini memerlukan *floating ground* untuk mengendalikan MOSFET sisi tinggi. Hal ini disebabkan karena pada kaki *source* MOSFET sisi atas tidak terhubung dengan *ground* sistem. Salah satu metode yang sering digunakan yaitu rangkaian *bootstrap* kapasitor. Secara sederhana rangkaian *bootstrap* adalah seperti rangkaian pompa pengisian daya yang terdiri dari saklar, kapasitor dan diode dimana tegangan sama dengan tegangan saklar ditambah tegangan suplai internal digunakan sebagai penggerak kaki *gate* pada *N-Channel* MOSFET sisi tinggi [17]. Gambaran dari cara kerja *bootstrap* kapasitor dapat dilihat pada gambar 2.16 dan 2.17 berikut ini.



Gambar 2. 16 Bootstrap Capacitor Charging

Sumber : <http://www.ti.com/lit/an/slva887/slva887.pdf>

Ketika MOSFT sisi rendah aktif dan MOSFET sisi tinggi mati, maka Q2 akan aktif sehingga pin HS akan terhubung kepada *ground*. Pada kondisi ini maka muatan akan mengisi kapasitor melalui diode dan resistor *bootstrap*. Proses ini merupakan proses *charging* dari kapasitor *bootstrap*. Sesaat kemudian ketika MOSFET sisi tinggi diaktifkan dan MOSFET sisi rendah dimatikan maka Q2 menjadi mati dan Q1 menjadi off. Pada kondisi ini kapasitor akan melepaskan beberapa muatan yang telah tersimpan untuk mengaktifkan MOSFET sisi tinggi melalui pin HO yang terhubung dengan kaki *gate* pada MOSFET. Proses ini merupakan proses *discharging* dari kapasitor *bootstrap*. Berikut ini merupakan gambaran dari proses *discharging* dari kapasitor *bootstrap* dapat dilihat pada gambar 2.17[17].



Gambar 2. 17 *Bootstrap Capacitor Discharging*

Sumber : <http://www.ti.com/lit/an/slva887/slva887.pdf>

MOSFET adalah perangkat yang dikontrol menggunakan tegangan sehingga memungkinkan untuk memanfaatkan muatan di dalam kapasitor untuk tujuan pengendalian. Namun pada akhirnya kapasitor akan kehilangan muatannya karena arus gerbang parasite dan resistansi internal yang tidak ideal (terbatas). Hal ini menyebabkan skema kontrol yang menggunakan kapasitor *bootstrap* memaksa MOSFET sisi tinggi mati pada waktu yang singkat dan mengaktifkan MOSFET sisi rendah agar kapasitor dapat diisi ulang. Hal ini menyebabkan nilai duty cycle yang diberikan pada pin masukan sisi tinggi (HI) akan selalu kurang dari 100% agar *bootstrap* kapasitor dapat mengalami pengisian ulang muatan melalui MOSFET sisi rendah [18].

2.2.7 Sistem Telemetry

Telemetry adalah sebuah teknologi pengukuran jarak jauh dan melaporkan informasi kepada perancang atau operator sistem. Kata telemetry berasal dari Bahasa Yunani yaitu *tele* artinya jarak jauh, sedangkan *metron* artinya pengukuran. Secara istilah telemetry diartikan sebagai suatu bidang keteknikan yang memanfaatkan instrument untuk mengukur sebuah variabel dan mengirimkan data hasil pengukuran ke penerima yang letaknya jauh secara fisik, berada diluar jangkauan pengamat atau user. Pada sistem *telemetry* diperlukan sebuah *device* yang dapat mengirimkan data secara jarak jauh[19]. Pada penelitian ini *device* yang digunakan untuk menjalankan fungsi pengiriman data menggunakan modul NRF24L01.

NRF24L01 merupakan modul komunikasi jarak jauh yang menggunakan frekuensi pita gelombang radio 2.4-2.5 GHz ISM (Industrial Scientific and Medical). NRF24L01 memiliki kecepatan sampai 2Mbps dengan pilihan opsi data rate 250 Kbps, 1 Mbps, dan 2 Mbps. *Transmitter* terdiri dari *synthesizer* frekuensi terintegrasi, kekuatan *amplifier*, osilator kristal, *demodulator*, *modulator* dan *Enhanced ShockBurst* mesin protokol. *output* daya, saluran frekuensi, dan *setup* protokol yang mudah diprogram melalui antarmuka SPI. Konsumsi arus yang digunakan sangat rendah, hanya 9.0mA pada daya *output* -6dBm dan 12.3mA dalam mode RX. *Built-in Power Down* dan mode *standby* membuat penghematan daya dengan mudah realisasi[20]. Berikut ini merupakan bentuk fisik dari modul NRF24L01 dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut ini.



Gambar 2. 18 Modul NRF24L01

Berikut ini merupakan spesifikasi dari modul NRF24L01 dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Spesifikasi Modul NRF24L01

| | |
|-----------------------------|-----------------------|
| <i>Operating Frequency</i> | 2400 – 2542 Mhz |
| <i>Modulation</i> | GMSK |
| <i>Transmit Power</i> | >20 dbm , 50 Ω |
| <i>Operating Voltage</i> | 2.7V – 3.6V |
| <i>Max Emission Current</i> | 115 mA |
| <i>Max Receive Current</i> | 45 mA |
| <i>Gain of PA</i> | 20 dB |
| <i>Gain of LNA</i> | 10 dB |

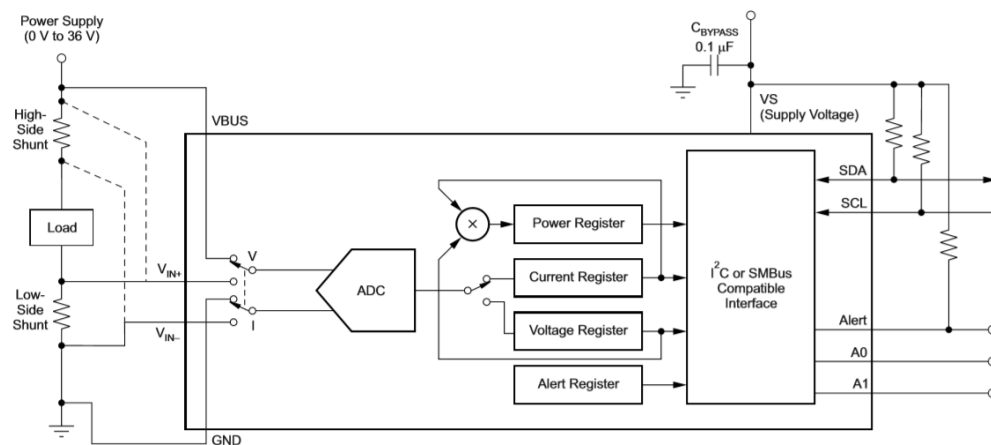
2.2.8 Texas Instrument INA226

Texas Instrument INA226 *Bi-Directional Current / Power Monitor IC* adalah sebuah sensor arus yang bekerja dengan menggunakan *resistor shunt*, sekaligus menghitung tegangan dan power yang digunakan oleh suatu perangkat yang dilengkapi dengan komunikasi antarmuka I2C. INA226 bekerja dengan cara menghitung tegangan drop pada sebuah Rshunt untuk menghitung nilai arus. Selain itu sensor ini dapat menghitung *bus supply voltage* dari suatu rangkaian. Dengan memprogram nilai kalibrasi, waktu conversi dan rata-rata dan dikominasikan dengan dengan perkalian maka dapat secara langsung menghitung nilai arus (Ampere) dan daya (watt). Sensor ini memiliki variasi tengan dari 0v sampai +36v. *Device* ini biasanya digunakan dalam server, peralatan telekomunikasi, komputer, *battery chargers*, dan banyak lainnya [21]. Berikut ini fitur yang dimiliki oleh perangkat ini dapat dilihat pada tabel 2.7.

Tabel 2. 6 Spesifikasi INA226

| | |
|-----------------------|---|
| Sensor Tegangan | 0 – 36V (Max) |
| Polaritas Sensor Arus | <i>High Side / Low Side (Unidirectional)</i> |
| Accuracy | 0.1 % Gain Error Max |
| Accuracy | 10 uV Offset Max |
| Operating Voltage | 2.7V – 5.5V |
| Variabel Pengukuran | Tegangan, Arus, Daya |

Berikut ini konstruksi penyusun dari sensor INA226 yang berasal dari datasheet dapat dilihat gambar 2.10.



Gambar 2. 19 Konstruksi Penyusun Sensor INA226