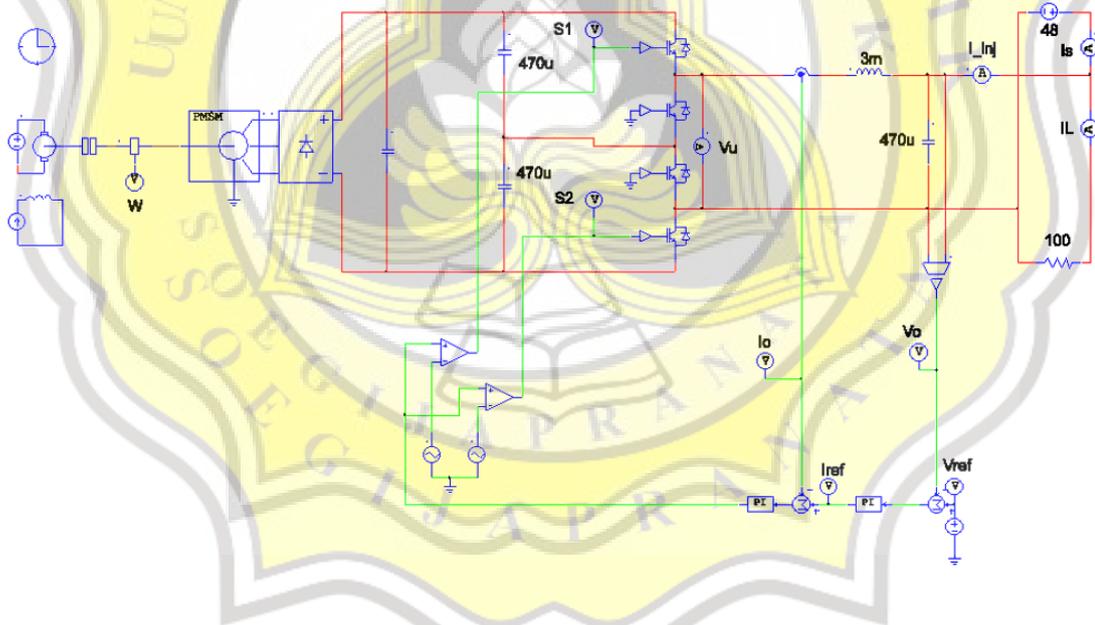


BAB III

DESAIN SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

3.1 Diagram Simulasi Dan Implementasi

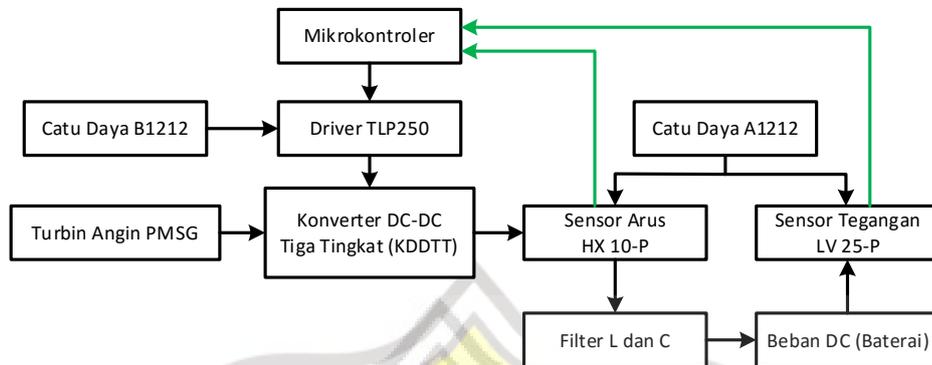
Sistem kendali PI ganda dalam aplikasi konverter DC-DC tiga tingkat (KDDTT) ini disimulasikan dengan menggunakan aplikasi perangkat lunak PSIM (*power simulator*) dengan tujuan untuk mempermudah dalam menganalisa apakah sistem dapat beroperasi dengan baik atau tidak. Apabila sistem bekerja dengan baik, kemudian dilanjutkan dengan mengimplementasikan secara langsung dalam bentuk perangkat keras akan jauh lebih mudah. Langkah pertama yaitu membuat simulasi dalam bentuk sistem analog seperti yang disajikan pada Gambar 3.1 berikut.



Gambar 3. 1 Rangkaian simulasi

Setelah pembuatan simulasi berhasil, selanjutnya rangkaian pada simulasi dapat diimplementasikan pada perangkat keras dengan merubah sistem kendali analog menjadi sistem kendali digital untuk mempermudah pengaplikasian yang dilaksanakan nantinya. Untuk mempermudah dalam implementasi rangkaian simulasi dapat diubah

menjadi diagram blok perangkat keras seperti yang disajikan pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Diagram blok perangkat keras

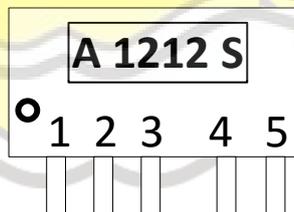
Sesuai gambar diatas, pada saat melakukan implementasi besar nilai referensi tegangan diatur sesuai dengan tegangan grid DC yaitu sebesar 48 Volt DC sehingga memerlukan proses kalibrasi agar tegangan sesuai dengan referensi. Turbin angin digunakan untuk memutar PMSG sehingga dapat menghasilkan tegangan keluaran AC 3 fasa, tegangan ini disearahkan dengan dioda penyearah 3 fasa dan di filter dengan kapasitor sehingga menghasilkan listrik DC, kemudian listrik DC yang dihasilkan digunakan untuk mensuplai KDDTT. Catu daya B1212 mampu menghasilkan tegangan yang terisolasi sehingga digunakan untuk mensuplai driver TLP250. 2 buah TLP250 digunakan untuk mengendalikan MOSFET pada KDDTT. Catu daya A1212 mampu menghasilkan tegangan keluaran yang terisolasi serta tegangan keluaran negatif sehingga dapat digunakan untuk mensuplai sensor arus dan tegangan. Sensor arus HX 10-P terhubung secara seri di antara terminal keluaran KDDTT dengan terminal masukan filter kapasitor. Sensor tegangan LV 25-P terhubung secara paralel dengan terminal keluaran KDDTT setelah filter kapasitor. Mikrokontroler disuplai dengan tegangan 3.3Volt DC dan digunakan sebagai pusat dalam mengendalikan seluruh sistem kendali PI ganda pada KDDTT serta dipilih karena memiliki performa yang lebih baik. Parameter dari desain dan implementasi penelitian disajikan dalam Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3. 1 Parameter penelitian

Parameter	Nilai
Kecepatan Generator PMSG	400 – 600 RPM
Filter induktor	2.4 mH
Filter kapasitor C4	100 uF
Kapasitor C1, C2, C3	470 uF
Beban tegangan baterai	48 VDC
Kecepatan frekuensi pensaklaran	25 Khz
Kendali PI untuk tegangan	0.1
Kendali PI untuk arus	0.1

3.2 Catu Daya A1212S Dan B1212S

Catu daya dengan tegangan keluaran yang terisolasi sangat dibutuhkan untuk mensuplai sensor dan TLP250. Beberapa jenis catu daya yang memiliki tegangan terisolasi yaitu catu daya A1212S dan catu daya B1212S. Gambar 3.3 di bawah ini merupakan catu daya A1212S beserta pin terminalnya.



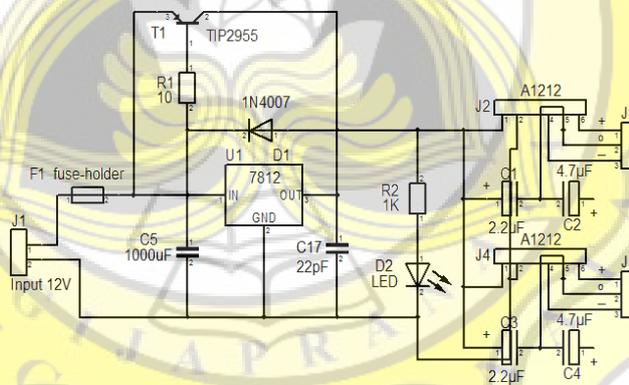
Gambar 3. 3 Terminal pada A1212S

Terdapat 5 buah terminal pada catu daya A1212S dan seluruh terminal terletak di bagian bawah dari catu daya A1212S. Pin 1 digunakan sebagai tegangan input

bernilai positif Volt DC, pin 2 digunakan sebagai tegangan input sebesar 0 Volt DC atau biasa disebut *ground*, pin 3 digunakan sebagai tegangan keluaran bernilai negatif Volt DC, pin 4 digunakan sebagai tegangan keluaran sebesar 0 Volt DC, dan pin 5 digunakan sebagai tegangan keluaran bernilai positif volt DC.

Catu daya A1212 hanya mampu menghasilkan daya 1 Watt sehingga hanya cocok digunakan untuk mensuplai beban dengan daya kecil saja, tetapi catu daya A1212S memiliki efisiensi kerja yang cukup tinggi yaitu sebesar 79%.

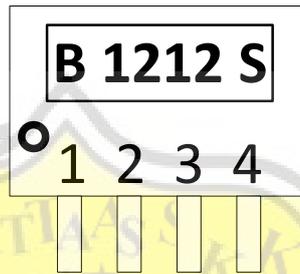
Sensor arus HX 10-P dan sensor tegangan LV 25-P perlu menggunakan rangkaian catu daya A1212S untuk menghasilkan tegangan suplai yang konstan, Gambar 3.4 dibawah ini merupakan rangkaian catu daya dengan menggunakan dua buah A1212S dan setiap catu daya A1212S menghasilkan tiga tegangan keluaran yaitu tegangan bernilai positif sebesar 12 Volt DC, 0 Volt DC, serta tegangan bernilai negatif sebesar 12 Volt DC.



Gambar 3. 4 Rangkaian catu daya A1212S

Sesuai rangkaian di atas, tegangan masukan yang digunakan sebesar 12 Volt DC dan 0 Volt DC yang didapatkan dari tegangan keluaran SMPS (*switch mode power supply*). Fuse digunakan untuk mengamankan rangkaian dari *short circuit* atau hubungan arus pendek. Transistor TIP2955 digunakan sebagai penguat arus dari rangkaian menuju A1212S. IC regulator LM7812 digunakan untuk membatasi tegangan masukan yang

menuju catu daya A1212S. LED digunakan sebagai indikator rangkaian bekerja. Kapasitor digunakan sebagai filter tegangan masukan dan keluaran pada catu daya A1212S. Selanjutnya yaitu catu daya B1212S beserta pin terminalnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 di bawah ini.



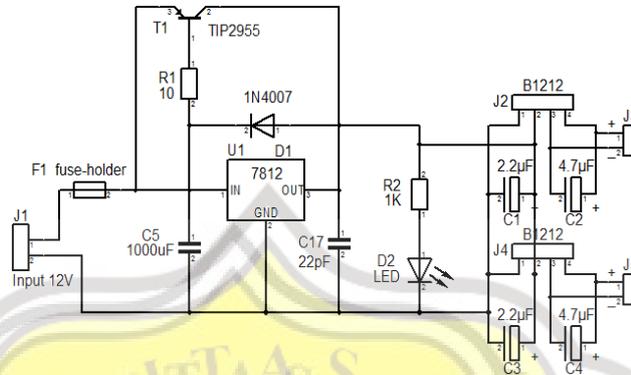
Gambar 3. 5 Terminal pada B1212S

Terdapat 4 buah terminal pada catu daya B1212S dan seluruh terminal terletak di bagian bawah dari catu daya B1212S. Pin 1 digunakan sebagai tegangan input sebesar 0 Volt DC atau biasa disebut *ground*, pin 2 digunakan sebagai tegangan input bernilai positif Volt DC, pin 3 digunakan sebagai tegangan keluaran bernilai negatif volt DC, dan pin 4 digunakan sebagai tegangan keluaran bernilai positif volt DC.

Catu daya B1212S hanya mampu menghasilkan daya 1 Watt sehingga hanya cocok digunakan untuk mensuplai beban yang membutuhkan daya kecil saja, tetapi catu daya B1212S memiliki efisiensi kerja yang cukup tinggi yaitu sebesar 78%.

TLP250 digunakan untuk mengendalikan MOSFET perlu menggunakan rangkaian catu daya B1212S untuk menghasilkan tegangan suplai yang konstan dan tentunya terisolasi, Gambar 3.6 dibawah ini merupakan rangkaian catu daya dengan menggunakan dua buah B1212S dan setiap catu daya B1212S

menghasilkan dua tegangan keluaran yaitu tegangan bernilai positif sebesar 12 Volt DC, serta tegangan bernilai 0 Volt DC.



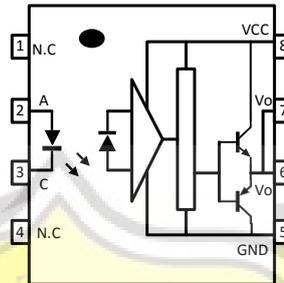
Gambar 3. 6 Rangkaian catu daya B1212S

Sesuai rangkaian di atas, tegangan masukan yang digunakan sebesar 12 Volt DC dan 0 Volt DC yang didapatkan dari tegangan keluaran SMPS (*switch mode power supply*). Fuse digunakan untuk mengamankan rangkaian dari *short circuit* atau hubungan arus pendek. Transistor TIP2955 digunakan sebagai penguat arus dari rangkaian menuju B1212S. IC regulator LM7812 digunakan untuk membatasi tegangan masukan yang menuju catu daya B1212S. LED digunakan sebagai indikator rangkaian bekerja. Kapasitor digunakan sebagai filter tegangan masukan dan keluaran pada catu daya B1212S.

3.3 TLP250

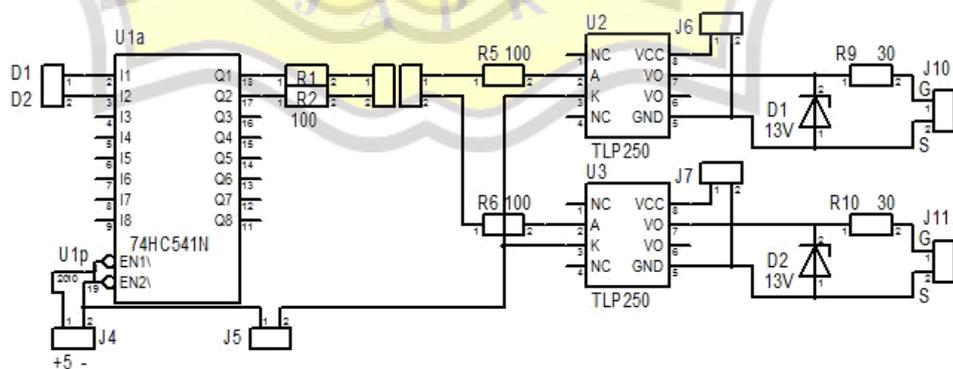
TLP250 digunakan sebagai *driver* dalam mengendalikan MOSFET. TLP250 dapat bekerja dengan kecepatan yang sangat tinggi bahkan sama dengan kecepatan cahaya dikarenakan TLP250 merupakan sebuah *optocoupler*. Secara konvensional terdapat 8 buah pin terminal pada TLP250 yang terbagi di dua sisi yaitu sisi bagian kiri dan sisi bagian kanan. Sisi bagian kiri terdapat 4 buah pin terminal dan hanya 2 buah pin

terminal yang dapat digunakan, kemudian sisi bagian kanan terdapat 4 buah pin terminal dan semuanya dapat digunakan. Gambar 3.7 di halaman selanjutnya merupakan terminal yang terdapat pada TLP250.



Gambar 3. 7 Terminal pada TLP250

Pin 1 dan pin 4 merupakan terminal yang tidak dapat digunakan dalam TLP250 NC berarti *not connect*, pin 2 merupakan kutub anoda LED dan digunakan sebagai jalur data masuk yang dikirimkan oleh mikrokontroler, pin 3 merupakan kutub katoda LED yang digunakan untuk tegangan masukan 0 volt atau *ground* dari mikrokontroler, pin 5 digunakan sebagai tegangan masukan bernilai 0 Volt DC, pin 6 dan pin 7 sudah terhubung di dalamnya serta pin ini digunakan sebagai data keluaran berupa tegangan DC yang nantinya dikirim menuju terminal *gate* pada MOSFET. TLP250 membutuhkan sebuah rangkaian agar dapat bekerja dengan baik dalam mengendalikan MOSFET, untuk rangkaiannya ditunjukkan dalam Gambar 3.8 dibawah ini.



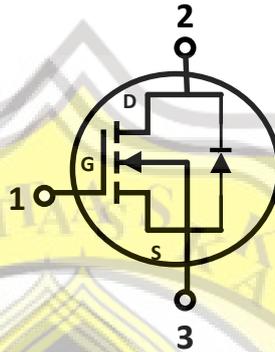
Gambar 3. 8 Rangkaian TLP250 sebagai driver MOSFET

Sesuai rangkaian di atas, terdapat komponen BUFFER yang digunakan untuk menaikkan data berupa tegangan 3.3 Volt DC yang dikirimkan oleh mikrokontroler menjadi 5 Volt DC. BUFFER dengan jenis 74HC541N memerlukan tegangan catu daya 5 Volt DC agar dapat bekerja, tegangan tersebut diperoleh dari tegangan 5 Volt DC yang telah disediakan oleh mikrokontroler. Setelah tegangan data keluaran menjadi 5 Volt selanjutnya diteruskan menuju kutub katoda TLP250 melalui sebuah resistor, dikarenakan TLP250 dapat bekerja dengan data berupa arus sebesar 5 mA. Seluruh kutub katoda TLP250 dihubungkan menjadi satu dan dipasangkan dengan 0 Volt atau GND pada mikrokontroler. Terminal VCC dan GND setiap TLP250 disuplai daya menggunakan satu buah catu daya B1212S. Data keluaran TLP250 diteruskan menuju terminal *gate* MOSFET dan terminal GND dihubungkan terminal *source* MOSFET. Dioda zener digunakan untuk mempertahankan tegangan keluaran agar tetap bernilai 12 Volt DC dan agar tidak terjadi *floating* yang mengakibatkan rangkaian tidak bekerja. Dalam implementasi penelitian ini menggunakan dua buah TLP250 untuk mengendalikan dua buah saklar daya MOSFET.

3.4 MOSFET IRFP460

MOSFET atau *metal oxide semiconductor field effect transistor* sesuai namanya yaitu sebuah transistor dengan daya yang lebih besar dan terbuat dari bahan semikonduktor. MOSFET secara konvensional memiliki 3 buah pin terminal yaitu pin 1 merupakan terminal *gate* atau gerbang yang digunakan untuk memutus dan mengalirkan daya dari terminal *drain* menuju terminal *source* yang dikendalikan oleh driver MOSFET yaitu TLP250, kemudian pin 2 merupakan terminal *drain* yang digunakan sebagai terminal tegangan masukan

bernilai positif atau biasa disebut VCC, kemudian pin 3 merupakan terminal *source* yang digunakan sebagai terminal tegangan masukan bernilai 0 volt atau *ground*. Ketiga pin terminal yang tersedia pada komponen MOSFET ditunjukkan pada Gambar 3.9 berikut.



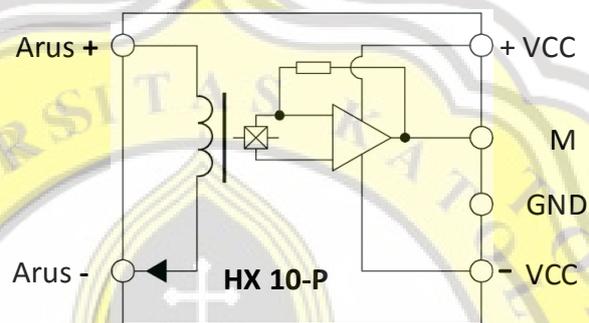
Gambar 3.9 Terminal pada MOSFET

MOSFET dapat digunakan sebagai saklar daya dalam KDDTT yang bekerja secara pensaklaran dengan kecepatan yang tinggi. Proses pensaklaran yang dimaksud merupakan proses bekerja seperti layaknya sebuah saklar yaitu hanya ON dan OFF saja. Ketika terminal *gate* diberi data berupa tegangan dari TLP250, maka MOSFET dalam posisi ON dan daya dari terminal *drain* dialirkan menuju terminal *source*. Ketika terminal *gate* tidak diberi data dari TLP250 berupa tegangan, maka MOSFET dalam posisi OFF dan daya tertahan di terminal *drain*. MOSFET sangat efisiensi dalam mengendalikan daya pada suatu konverter, oleh karena itu KDDTT menggunakan dua buah MOSFET dengan jenis IRFP460 untuk diimplementasikan.

3.5 Sensor Arus LEM HX10-P

Dalam mengendalikan arus keluaran KDDTT memerlukan sebuah sensor arus, dari banyaknya jenis sensor arus yang dijual dipasaran hanya digunakan

satu buah sensor arus yaitu sensor arus LEM HX 10-P. Sensor arus ini memiliki tingkat ketelitian yang sangat baik dan memiliki efisiensi kerja yang tinggi, sehingga kesalahan dalam mengukur arus akan sedikit sekali apabila kita mengetahui kegunaan dalam setiap terminal yang tersedia pada sensor arus. Dalam mempermudah pengenalan terminal beserta fungsinya yang tersedia pada sensor arus LEM HX 10-P disajikan dalam Gambar 3.10 berikut ini.

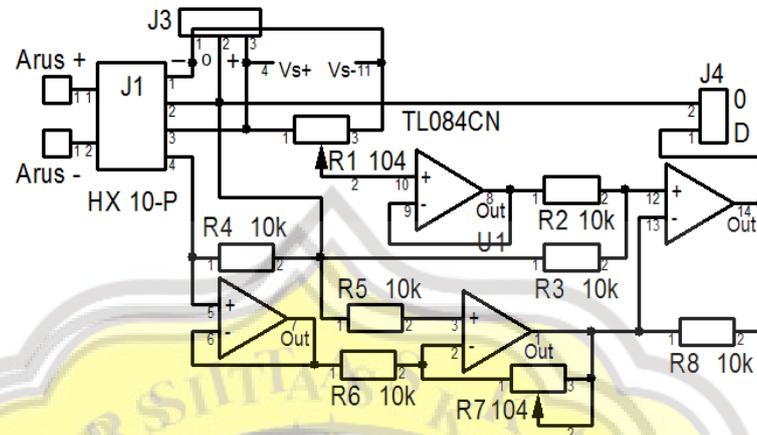


Gambar 3. 10 Terminal pada sensor arus LEM HX 10-P

Terdapat 6 buah pin terminal pada sensor arus HX 10-P, 2 buah terminal pada bagian sebelah kiri digunakan sebagai terminal masukan arus yang akan diukur, pada bagian sebelah kanan terdapat 4 buah pin terminal yaitu terminal +VCC digunakan sebagai tegangan masukan bernilai positif Volt DC, terminal M merupakan data keluaran berupa tegangan dari sensor arus HX 10-P, terminal GND digunakan sebagai tegangan masukan bernilai 0 Volt DC, dan terminal yang terakhir yaitu terminal -VCC digunakan sebagai tegangan masukan bernilai negatif Volt DC.

Sensor arus HX 10-P agar dapat bekerja dengan baik memerlukan sebuah rangkaian penguat sensor arus sehingga sensor arus mampu membaca arus keluaran KDDTT dan hasil datanya yang diperoleh mampu dikirimkan menuju

ke ADC sebuah mikrokontroler, rangkaian penguat dari sensor arus HX 10-P ditunjukkan pada Gambar 3.11 di halaman selanjutnya berikut ini.



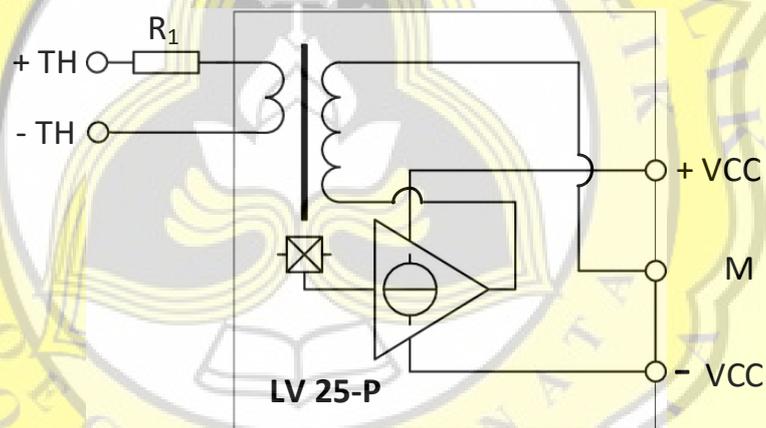
Gambar 3. 11 Rangkaian penguat sensor arus LEM HX10-P

Rangkaian Op-Amp dibutuhkan dalam sensor arus HX 10-P dengan rangkaian seperti pada gambar di atas. Rangkaian Op-Amp ini digunakan untuk memperkuat data keluaran berupa tegangan keluaran sensor dan dengan Op-Amp sensor arus HX 10-P dapat dikalibrasi untuk menyesuaikan pembacaan ADC pada mikrokontroler dengan mengatur besarnya nilai resistansi *offset* yaitu *trimmer* R1 dan *gain* yaitu *trimmer* R7 dengan cara memutarinya menggunakan obeng minus kecil secara perlahan.

Rangkaian penguat sensor arus ini dapat melakukan pengukuran arus keluaran pada KDDTT hingga 10 Ampere. Cara kerja penguat sensor arus ini yaitu besaran arus yang diukur diubah menjadi besaran tegangan antara 0 Volt DC hingga 3.3 Volt DC sesuai pengukuran arus dan sesuai dalam pembacaan ADC pada sebuah mikrokontroler yang digunakan dalam penelitian ini. Sisi masukan dengan sisi keluaran sensor arus terisolasi sehingga seluruh komponen yang terhubung dengan sensor arus akan aman dari lonjakan tegangan tinggi dari sensor arus HX 10-P.

3.6 Sensor Tegangan LV 25-P

Dalam mengendalikan tegangan keluaran KDDTT memerlukan sebuah sensor tegangan, dari banyaknya jenis sensor tegangan yang dijual secara umum dan hanya digunakan satu buah sensor tegangan yaitu sensor arus LV 25-P. Sensor tegangan ini memiliki tingkat ketelitian yang sangat baik dan memiliki efisiensi kerja yang tinggi, sehingga kesalahan dalam mengukur tegangan akan sedikit sekali apabila kita mengetahui kegunaan dalam setiap terminal yang tersedia pada sensor tegangan. Dalam mempermudah pengenalan terminal beserta fungsinya yang tersedia pada sensor tegangan LV 25-P disajikan dalam Gambar 3.12 berikut ini.

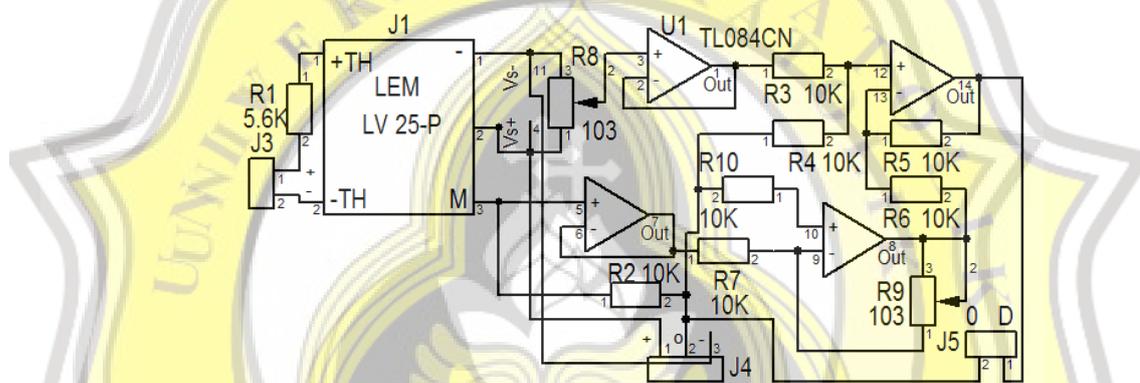


Gambar 3. 12 Terminal pada sensor tegangan LV25-P

Terdapat 5 buah pin terminal pada sensor tegangan LV 25-P, 2 buah terminal pada bagian sebelah kiri digunakan sebagai terminal masukan tegangan yang akan diukur, pada bagian sebelah kanan terdapat 3 buah pin terminal yaitu terminal +VCC digunakan sebagai tegangan masukan bernilai positif Volt DC, terminal M merupakan data keluaran berupa tegangan keluaran dari sensor

tegangan LV 25-P, dan terminal -VCC digunakan sebagai tegangan masukan bernilai negatif Volt DC.

Sensor tegangan LV 25-P agar dapat bekerja dengan baik memerlukan sebuah rangkaian penguat sensor tegangan sehingga sensor tegangan mampu membaca tegangan keluaran KDDTT dan hasil datanya yang diperoleh mampu dikirimkan menuju ke ADC sebuah mikrokontroler, rangkaian penguat dari sensor tegangan LV 25-P ditunjukkan pada Gambar 3.13 di halaman selanjutnya berikut ini.



Gambar 3. 13 Rangkaian penguat sensor tegangan LV25-P

Rangkaian *Op-Amp* dibutuhkan dalam sensor tegangan LV 25-P dengan rangkaian seperti pada gambar di atas. Rangkaian *Op-Amp* ini digunakan untuk memperkuat data keluaran berupa tegangan keluaran sensor dan dengan *Op-Amp* sensor tegangan LV 25-P dapat dikalibrasi untuk menyesuaikan pembacaan ADC pada mikrokontroler dengan mengatur besarnya nilai resistansi *offset* yaitu *trimmer* R8 dan *gain* yaitu *trimmer* R9 dengan cara memutarnya menggunakan obeng minus kecil secara perlahan.

Rangkaian penguat sensor tegangan ini dapat melakukan pengukuran tegangan keluaran pada KDDTT hingga 500 Volt. Cara kerja penguat sensor tegangan ini yaitu

besaran tegangan yang terbaca diubah menjadi tegangan antara 0 Volt DC hingga 3.3 Volt DC sesuai pengukuran tegangan dan sesuai dalam pembacaan ADC pada sebuah mikrokontroler yang digunakan dalam penelitian ini. Sisi masukan dengan sisi keluaran sensor tegangan terisolasi sehingga seluruh komponen yang terhubung dengan sensor tegangan akan aman dari lonjakan tegangan tinggi dari sensor tegangan LV 25-P.

3.7 Mikrokontroler STM32F407VET6

Mikrokontroler merupakan perangkat elektronik yang mampu mengolah pemrograman menjadi sebuah instruksi perintah dalam mengerjakan sesuatu sesuai isi program. Mikrokontroler memiliki beberapa CPU (*central processing unit*), beberapa memori beserta pin I/O yang dapat diprogram secara bebas. STMicroelectronics merupakan pabrikan dari STM32F407VET, dikarenakan memiliki performa tinggi dan dapat memproses dengan kecepatan tinggi serta pembacaan ADC yang akurat sehingga mikrokontroler ini banyak digunakan dalam mengendalikan sistem yang kompleks. Gambar 3.14 di bawah ini menunjukkan mikrokontroler STM32F407VET6.



Gambar 3. 14 Mikrokontroler STM32F407VET6

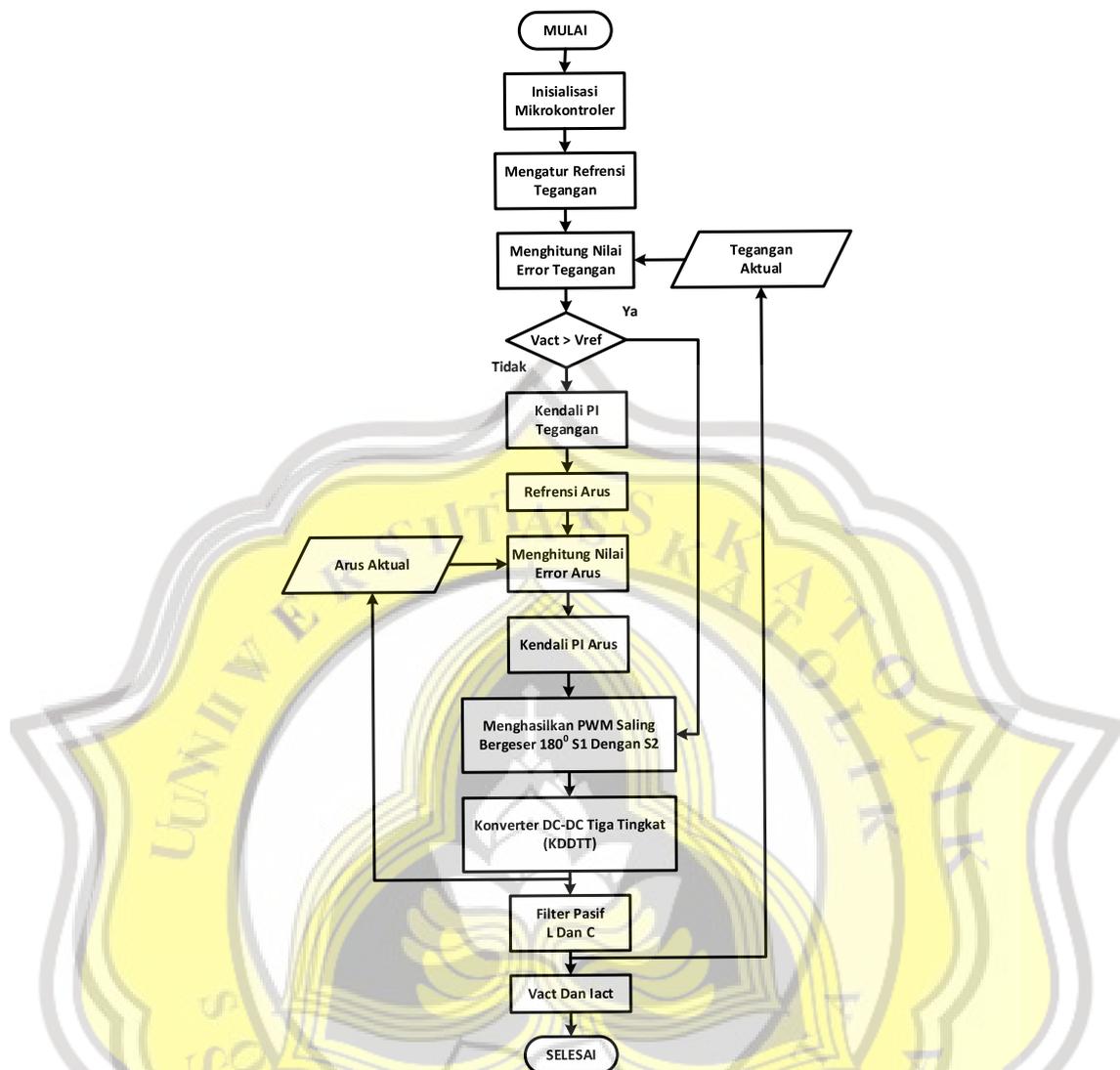
Beberapa fitur yang terdapat dalam STM32F407VET6 antara lain, yaitu :

- a. Menggunakan CPU dengan FPU ARM® 32bit Cortex®-M4
- b. Kecepatan maksimal frekuensi CPU yaitu 168 MHz

- c. VCC mulai dari 1.8 hingga 3.6 Volt DC
- d. Menggunakan kristal dengan kecepatan sistem 8 MHz
- e. Memori flash 512 KB
- f. 24 saluran ADC 3x12-bit
- g. DAC 2x12-bit
- h. Memiliki RTC dengan baterai CR1220
- i. 3 buah USART dan 2 buah UART
- j. 3 buah I2C, 2 buah I2S, 3 buah SPI, sebuah SDIO, dan 2 buah CAN
- k. Memiliki 17 timer yaitu 2 timer 32-bit dan 12 timer 16—bit dengan kecepatan hingga 168 MHz, setiap timer menggunakan 4 IC/PWM/OC/sinyal pulsa dan masukan encoder quadratur
- l. Memiliki port I/O sebanyak 140 dengan interupsi yang terdiri dari 136 I/O kecepatan tinggi hingga 84 MHz dan 138 I/O toleransi 5V.

3.8 Algoritma Pemrograman

Seluruh sistem kendali PI ganda pada KDDTT dalam mengendalikan tegangan dan arus keluaran dari PMSG aplikasi turbin angin dibuat dalam program secara digital yang dikelola oleh mikrokontroler. Gambar 3.15 memberikan gambaran tentang alur kerja kerja program dalam bentuk flowchart seperti berikut.



Gambar 3. 15 Flowchart algoritma pemrograman

Dimulai dari inisialisasi pin I/O yang digunakan, kemudian mengkalibrasi nilai referensi tegangan agar sistem dapat bekerja dengan baik dan tegangan yang dihasilkan sesuai dengan referensi yang telah ditentukan. Mikrokontroler menghitung nilai error tegangan yang dihasilkan dari pengurangan antara nilai tegangan aktual dengan nilai tegangan referensi. Selanjutnya apakah nilai tegangan aktual lebih besar daripada tegangan referensi, jika ya maka nilai error tegangan akan di proses dengan algoritma kendali PI tegangan dan menghasilkan nilai referensi arus, proses selanjutnya

menghitung nilai error arus yang dihasilkan dari pengurangan antara nilai arus aktual dengan nilai arus referensi, kemudian nilai error arus di proses dengan algoritma kendali PI arus sehingga menghasilkan PWM yang saling bergeser 180^0 antara PWM S1 dengan S2. Jika nilai tegangan aktual kurang dari tegangan referensi maka proses langsung diteruskan menuju pembuatan PWM yang saling bergeser 180^0 antara PWM S1 dengan S2. PWM tersebut selanjutnya digunakan untuk menjalankan konverter DC-DC tiga tingkat (KDDTT) melalui driver TLP250 dan MOSFET IRFP460 sehingga KDDTT menghasilkan tegangan keluaran sesuai referensi serta arus keluaran sesuai kebutuhan beban.

Dari flowchart pada Gambar 3.15 diatas dapat ditulis ke dalam bentuk bahasa C dan C++ pada pemrograman dengan menggunakan aplikasi Arduino IDE seperti yang disajikan di bawah ini.

```
#include <STM32F4ADC.h>
```

Pemanggilan *Header Library*

```
STM32ADC inADC(ADC1);
```

Inisialisasi ADC

```
int count, car, car1, car2;  
int mod_final;  
int vact, iact, err, err_v, iref;  
double itg, lastitg, pi, mod, Bmod, P, I;  
double vref, itg_v, lastitg_v, pi_v, P_v, I_v;  
uint8_t analog_pins[] = {PA0, PA1, PA4};
```

Deklarasi data variabel

```
/* KENDALI PI */
```

```
float kp_v = 0.001; //Kp tegangan
```

```
float ki_v = 0.1; //Ki tegangan
```

```
float kp = 0.001; //Kp arus
```

```
float ki = 0.1; //Ki arus
```

Deklarasi konstanta
kendali PI ganda

```
void setup() {
```

Program *setup*

```
for (uint8_t x = 0; x < sizeof(analog_pins); x++)
```

```
pinMode(analog_pins[x], INPUT_ANALOG);
```

Deklarasi data variabel

```
Timer5.init();
```

```
Timer5.pause();
```

```
Timer5.setMasterMode(TIMER_MASTER_MODE_UPDATE);
```

```
Timer5.setPeriod(10000);
```

```
Timer5.setMode(TIMER_CH2, TIMER_OUTPUT_COMPARE);
```

```
Timer5.setCompare(TIMER_CH2, 1);
```

```
Timer5.attachInterrupt(TIMER_CH2, INT1);
```

```
Timer5.refresh();
```

```
Timer5.resume();
```

Inisialisasi Timer 5
sebagai *interrupt*

```
Timer3.init(); //PWM timer  
Timer3.setPeriod(20);  
Timer3.refresh();  
Timer4.init();  
Timer4.setPeriod(20);  
Timer4.refresh();  
Timer4.setCount(1689);  
Timer3.resume();  
Timer4.resume();
```

Inisialisasi Timer 3 dan 4
sebagai PWM

```
pinMode(PB0, PWM);  
pinMode(PB6, PWM);  
pinMode(PB7, PWM);  
pinMode(PB8, PWM); }
```

Inisialisasi *port*
sebagai timer PWM

```
void loop() {
```

Program *Loop*

```
while (1) {  
  sensor();  
  Control(); } }
```

Program *While* sebagai kendali
dan membaca sensor

```

void INT1() {
vref=2850;

if (vref > 4000)
{ vref = 4000; }

if (vref < 0)
{ vref = 0; }}

```

Program Timer Interupt 1
dan kalibrasi referensi tegangan

```

void sensor() {
vact = map(analogRead(PA0), 0, 4095, 0, 4000); //v actual
iact = map(analogRead(PA1), 0, 4095, -2000, 2000); //act arus
//vref = map(analogRead(PA4), 0, 4095, 0, 4000); //v ref }

```

Program
pembacaan
sensor

```

void Control() {
err_v = vref - vact;
P_v = kp_v * err_v;
itg_v = lastitg_v + err_v * 0.0001;
I_v = ki_v * itg_v;
pi_v = P_v + I_v;

```

Program kendali
PI untuk tegangan

```

if (pi_v > -2000 && pi_v < 2000)
{ lastitg_v = itg_v; }

```

Program anti *windup* PI tegangan

```
iref = pi_v ;  
err = iref - iact;  
P = kp * err;  
itg = lastitg + err * 0.0001;  
I = ki * itg;  
pi = P + I;
```

Program kendali
PI untuk arus

```
mod = pi;  
if (mod < -2500) //limiter  
    mod = -2500;  
if (mod > -2500 && mod < 3360) //mod anti windup  
{ lastitg = itg; }
```

Program anti windup
PI arus

```
pwmWrite(PB6, mod); //S1  
pwmWrite(PB0, mod); //S2
```

Eksekusi timer PWM