

RANCANG BANGUN MODEL PEMBATAS ARUS LISTRIK BERBASIS MIKROKONTROLLER ATMEGA328 DENGAN MODUL ARDUINO UNO

SALISTIA PUTRA PERDANA, SYAHRIAL, SITI SAODAH

Jurusan Teknik Elektro – Institut Teknologi Nasional (Itenas) Bandung

Email : salis030289@gmail.com

ABSTRAK

Pada umumnya, pembatasan arus dapat berupa MCB yang dapat disetting dan yang tetap. Pembatasan arus listrik yang mengambil fungsi-fungsi MCB dapat dilakukan dengan sebuah mikrokontroler ATmega328 dengan modul Arduino Uno. Masukan isyarat dicuplik oleh ADC dari sensor arus efek hall bertipe ACS714LLCTR-30A-T untuk menentukan besar arus RMS jala-jala. Waktu tunda pemutusan jala-jala dihitung dengan menggunakan kaidah pertidaksamaan dalam matematika. Pemutusan jaringan listrik dilakukan oleh rangkaian TRIAC BT139 yang didrive optoTriac MOC3041. Keypad, LCD, dan Pushbutton dipasang untuk tujuan antarmuka dengan pengguna. Setelah sistem dibuat, dilakukan pengujian. Pengujian ADC mempunyai kesalahan 0,47%. Pengujian pembacaan sensor arus mempunyai kesalahan sebesar 0,13%. Pada pengujian arus inrush, sistem bekerja dengan baik dengan menghindari trip saat beban dinyalakan. Pada pengujian beban lebih, sistem dapat memberikan waktu tunda untuk memutuskan jaringan sesuai penyetingan yang diberikan pada sistem. Terakhir, pengujian beban hubung singkat, sistem tidak mampu mencegah gangguan ini karena dua hal, arus hubung singkat ($I_{sc} > 125A$, dibuktikan oleh tripnya MCB Heger MY325 C) melebihi batas toleransi arus lebih sensor arus ACS714 (100 A) dan TRIAC BT139 (3 cycle untuk 120 A).

Kata kunci: Arduino Uno, MCB, mikrokontroler AtMega328, pembatas arus, sensor arus ACS714, TRIAC BT139.

ABSTRACT

Generally, a current limiting can do using setted or fixed MCB. In this project, a settable current limiting device has been developed. Functions of the MCB that taked by eectric current limiting, can be performed by the microcontroller ATmega328 in Arduino Uno module. The input signals were sampled by the input ADC from the hall effect current sensor type ACS714LLCTR-30A-T to determine the magnitude of the RMS current in an electrical grid. A time delay termination electrical grid was calculated by using a mathematical linear inequalities theorem. This termination was done by a series of electrical grid TRIAC BT139 which was driven by the Optotriac MOC3041. The keypad, LCD and pushbutton were installed for user interface. Futhermore the system was created and tested. The ADC testing had 0.47% error. The current sensor reading test had error of 0.13%. In the inrush current testing, the system worked well by avoiding trips when the load was turned on. In other load testing, the system could provide a time delay to decide the appropriate network setup given in the system. Finally in the test load short circuit, the system was not able to work properly because of two factors, i.e short-circuit current ($I_{sc} > 125A$, evidenced by the MCB trip Heger MY325 C) exceeds the tolerance limit overcurrent of current sensor (ACS714 Overcurrent Transient Tolerance as 100 A) and TRIAC BT139 (3 cyle to 120 A).

Keywords: Arduino Uno, MCB, ATmega328 microcontroller, current limiters, ACS714 current sensor, triac BT139.

1. PENDAHULUAN

Suatu sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa seksi, yaitu: seksi pembangkit, seksi transmisi, dan seksi distribusi. Seksi distribusi yang terdiri dari JTM dan JTR adalah seksi dari sistem tenaga listrik yang berhubungan langsung ke pelanggan (Sumardjati Prih, 2008).

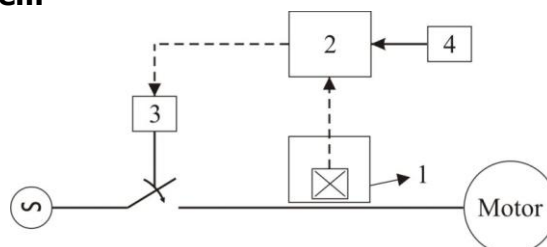
Kelayakan suatu sistem tenaga listrik dilihat dari kemampuannya menjaga dan mentransmisikan energi listrik ke pelanggan dengan meminimalisasi setiap gangguan. Gangguan dalam sistem tenaga listrik dapat berupa gangguan permanen dan gangguan non-permanen. Ganggaun ini seperti terjadinya hubung singkat dan beban lebih. Oleh karena itu dibutuhkan sistem proteksi untuk menjaga kelangsungan pemasokan energi listrik (zuhal, 1995). Pada Jaringan Tegangan Rendah (JTR) terdapat peralatan sistem proteksi seperti MCB (*Mini Circuit Breaker*) dan fuse. Tetapi penerapan peralatan proteksi tersebut terutama pada *Circuit Breaker* (CB) konvensional terdapat beberapa kekurangan, diantaranya:

1. Tidak selektif terhadap arus *inrush*.
2. Terdapat busur api ketika proses *tripping* dan *reclosing*.
3. Ketika pemutusan jaringan listrik (*trip*) terjadi, untuk menghubungkan kembali jaringan, harus dilakukan secara manual dan tidak dapat dikendalikan dari jarak jauh.
4. Ketika CB *trip*, tidak dapat dianalisa letak lokasi terjadinya gangguan dan bagaimana gelombang arus gangguan tersebut.

Melalui penelitian ini dirancang dan dibuat sebuah sistem yang dibuat mengambil fungsi-fungsi dari CB yaitu pembatas arus listrik dengan menggunakan mikrokontroler. Pembatas arus ini dirancang dapat membedakan antara arus gangguan (arus hubung singkat dan arus beban lebih) dari arus bukan gangguan (arus normal dan arus *inrush*) sehingga dapat selektif terhadap arus *inrush* dan hanya memutuskan jaringan ketika ada arus gangguan saja.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Blok diagram sistem



Gambar 1. Diagram blok sistem

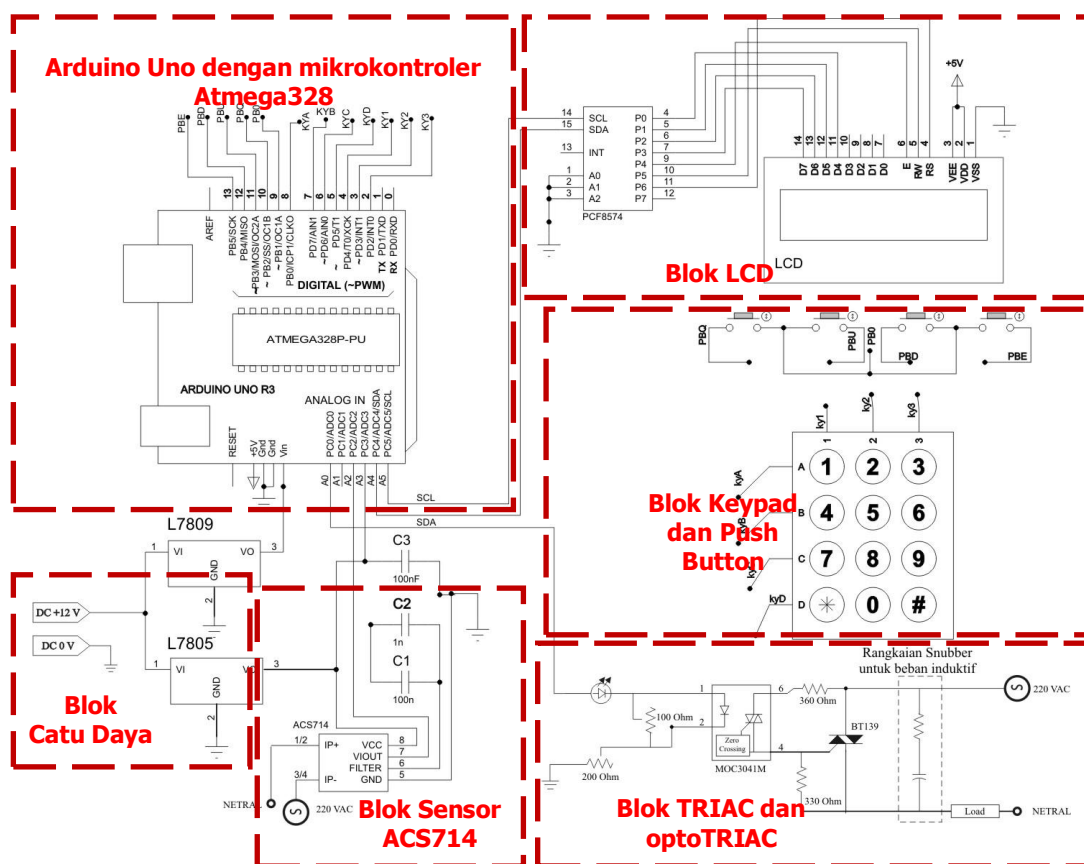
Keterangan:

1. Blok rangkaian sensor arus
2. Blok mikrokontroler
3. Blok rangkaian pemutus jaringan listrik/ *tripping* (Opto-TRIAC dan TRIAC)
4. Blok rangkaian catu daya

Gambar 1 memperlihatkan diagram blok sistem secara keseluruhan, dimana secara garis besar mengikuti prinsip kerja CB. Sensor yang digunakan adalah sensor arus *hall effect* ACS714LLCTR-30A-T yang mempunyai range arus masukan -30 A sampai dengan 30 A. Sinyal proporsional terhadap arus bolak-balik jala-jala hasil konversi sensor ini berupa sinyal analog tegangan yang berayun diantara range 0,5-4,5V dengan V_{reff} DC-Offset 2,5 V. Sensor ini mempunyai sensitifitas sebesar 66 mV setiap perubahan 1 A arus input (Allegro MicroSystems Inc, 2011).

Sinyal output berupa tegangan tidak diubah menjadi sinyal tegangan searah agar dapat mendeteksi perubahan arus yang cepat (Kurniawan, 2011). Sinyal dari sensor arus dimasukkan ke pin A0 Board Arduino Uno yang memiliki mikrokontroler ATmega328 dengan memori SRAM 2 KB dan ADC (*Analog to Digital Converter*) 10 bit. Kemampuan board Arduino Uno untuk proses ADC selama $100 \mu\text{s}$, artinya maksimal kecepatan frekuensi cuplikan (*sampling rate frequency*) sebesar 10.000 Hertz. Secara teori, proses *sampling* dapat dilakukan sebanyak 200 kali jika frekuensi jala-jala 50 Hertz, maka seharusnya terdapat cukup waktu untuk mengerjakan algoritma lainnya. Pada perancangan sistem ini, proses *sampling* dipilih sebanyak 33 kali dalam waktu 20 milidetik. Frekuensi cuplikan (*sampling frequency*) ini cukup untuk menghitung RMS (*Root Mean Square*) arus dengan harmonik hingga orde ke-13 jika frekuensi jala-jala 60 Hertz (Square D, 2002). Sinyal output dari sensor arus yang diumpungkan ke pin A0 ATmega328 dijadikan masukan untuk perhitungan nilai arus RMS.

Blok pemutus jaringan listrik mengadopsi rangkaian optocoupler MOC3041 (Fairchild, 2010). Apabila beban bersifat induktif, maka rangkaian snubber harus dipasang. Pada penelitian ini dipasang rangkaian *snubber* dengan $C = 0,01 \mu\text{F}$ 250 VAC dan $R=330\Omega$ 20W ketika beban berupa motor induksi 3 fasa 1 Hp menjadi bahan pengujian. Blok ini menggunakan Opto-Triac MOC3041 yang berfungsi sebagai pemacu TRIAC BT139 yang mempunyai batas arus hingga 16 A dengan tegangan maksimal 600 V (NXP, 2013).



Gambar 2. Sistem secara keseluruhan

Gambar 2 memperlihatkan sistem secara keseluruhan. Blok mikrokontroler menggunakan modul Board Arduino Uno R-3, blok sensor menggunakan sensor ACS714, blok pemutus daya menggunakan TRIAC BT139 dan MOC3041, dan blok catu daya menggunakan L7809CV dan L7805CV. Rangkaian Penampil (LCD) menggunakan IO-Expander bertipe PCF8574

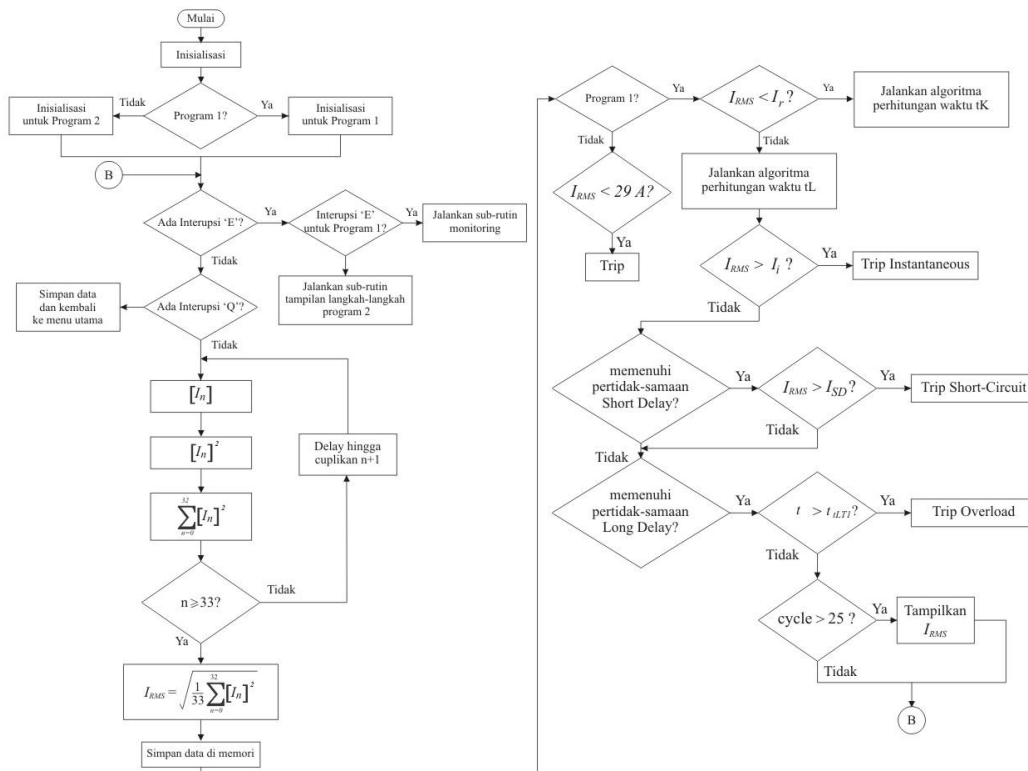
dengan koneksi I2C ke Arduino. Penulis menggunakan IC ini karena jika I/O Arduino digunakan untuk LCD dan Keypad secara bersamaan, maka I/O Arduino kurang dari yang diperlukan. Sinyal data ditransmisikan dari Arduino melalui sambungan I2C secara paralel antara bus data (SDA) dan bus address (SCL). Dalam pengoperasian alat ini, dibutuhkan suplai tegangan untuk board Arduino Uno dan sensor arus ACS714. Suplai tegangan dari sistem proteksi harus terpisah dari jala-jala dengan tujuan untuk keamanan sistem. Oleh karena itu dalam penelitian ini, suplai tegangan berasal dari accu. Accu yang dipilih memiliki kapasitas 12 V dengan arus 26 AH. Suplai tegangan berasal dari accu 12 V yang diregulasikan dengan komponen regulator L7805 dan regulator L7809CV. Regulator L7805CV selain digunakan untuk suplai tegangan sensor arus ACS714, juga diumpungkan ke pin A3 Arduino Uno sebagai tegangan referensi dalam perhitungan RMS.

2.2. Diagram alir sistem

Program antar muka dirancang dengan menyediakan menu utama yang terdiri dari:

- a. Proteksi : menu untuk menjalankan program proteksi
- b. Rekam : menu untuk menjalankan program rekam arus apa adanya
- c. *Setting* : menu untuk menjalankan program *setting* parameter alat pembatas arus, yaitu I_r , I_{sd} , I_l , t_{1r} , t_{2r} , t_{3r} , dan t_4 .
- d. Kirim data : menu untuk mengirimkan data rekaman I_{rms} ke komputer

Program proteksi dan program rekam digabungkan menjadi satu kesatuan agar penyimpanan program di dalam memori mikrokontroler dapat dioptimalkan. Di dalam kedua program ini terdapat subrutin pembacaan dan perhitungan nilai arus RMS (*Root Mean Square*) serta ditambah dengan subrutin penyimpanan data hasil rekaman nilai arus RMS. Setelah subrutin penyimpanan dilakukan, maka dilanjutkan ke subrutin pemetaan, namun ada perbedaan diantara program proteksi dan program rekam.



Gambar 3. Diagram alir kesatuan dari program proteksi dan program rekam

Gambar 3 menunjukkan diagram alir dari gabungan program proteksi dan program rekam. Subrutin penghitung nilai RMS arus dibuat sedemikian rupa agar waktu pembacaan arus dapat senyata mungkin. Pada sistem ini pencuplikan dipilih sebanyak 33 kali ($f_s = 33$ kali frekuensi jala-jala) setiap perioda arus. Waktu (T_s) yang tersedia setiap pencuplikan adalah $T_s = \frac{20 \text{ ms}}{33} = 606 \mu\text{s}$ (frekuensi jala-jala 50 Hertz). Agar berjalan efektif, pada sistem ini proses pencuplikan dimasukkan ke dalam proses perhitungan Nilai RMS. Maka algoritma perhitungan Nilai RMS dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Cuplik arus ke- n dan masukan ke dalam variable sebagai I_n
2. Kuadratkan I_n menjadi I_n^2 dan akumulasikan I_n^2 dengan $[I_{n-1}]^2$ menjadi

$$\sum_{n=0}^{N-1} [I_n]^2 \quad \dots(1)$$

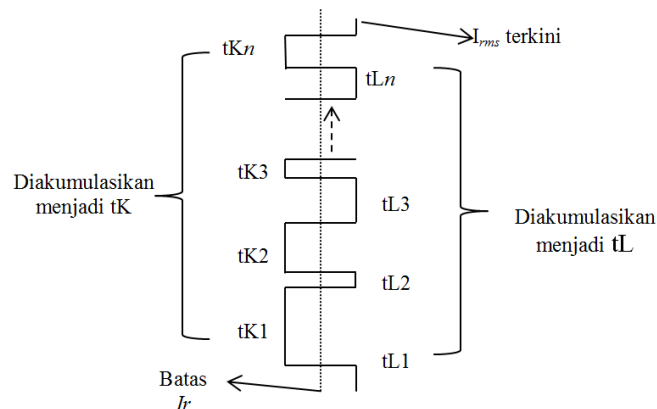
3. Bagi dengan $N=33$ dan akarkan data akumulasi tersebut

$$\sqrt{\frac{1}{33} \sum_{n=0}^{32} [I_n]^2} \quad \dots(2)$$

Proses ke-1 dan ke-2 dapat digabungkan, masing-masing membutuhkan waktu selama 148 μs dan 20 μs . Pada pencuplikan terakhir tidak dilakukan penundaan. Setelah proses berulang 33 kali, perhitungan RMS dan dimasukkan ke dalam variabel $\text{RMS}_{\text{sampling}}$. Untuk pengubahan menjadi nilai arus (I_{rms}) maka dihitung berdasarkan rumus:

$$I_{rms} = 30 \times \left[\frac{(\text{RMS}_{\text{sampling}} - 0.6)}{\left\{ \frac{(0.066 \times 30)}{5} \right\} \times 1023} \right] \quad \dots(3)$$

Algoritma yang digunakan untuk pemetaan terdiri dari : Algoritma perhitungan waktu tunda trip (t) dan Algoritma pemetaan.



Gambar 4. Ilustrasi algoritma penghitung waktu tunda trip

Algoritma perhitungan waktu terdiri dari 2 (dua) kondisi sebagai berikut:

1. Ketika $I_{rms} \geq I_r$ maka simpan akumulasi waktu ketika $I_{rms} \geq I_r$ ke dalam variabel t_L .
2. Ketika $I_{rms} < I_r$ maka simpan akumulasi waktu ketika $I_{rms} < I_r$ ke dalam variabel t_K .
3. Tentukan status waktu tunda trip (t) dengan melakukan perhitungan :

$$t = t_L - t_K \quad \dots (4)$$

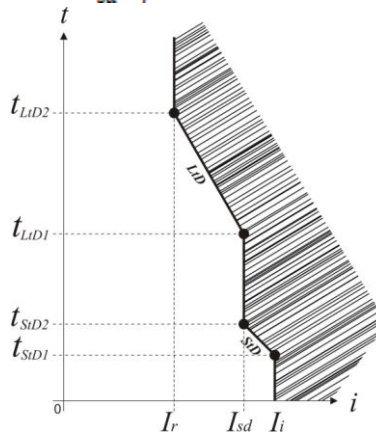
Adapun algoritma pemetaan bertujuan untuk menentukan apakah waktu tunda trip t sudah melebihi batas tertentu atau tidak. Ketika melebihi batas tertentu, maka sistem akan segera memutus jaringan jala-jala dan memberikan tanda bahwa pemutusan terjadi dengan jenis gangguan tertentu. Dasar dari algoritma pemetaan yang digunakan adalah teorema pertidak-samaan garis lurus dalam matematika.

Pada penerapannya, terdapat 2 (dua) garis yang menjadi patokan penyetingan kurva arus. Garis-garis ini merupakan pertidaksamaan yang mempunyai domain-domainnya sendiri.

Garis-garis ini adalah:

$$t \geq \frac{t_{StD1} - t_{StD2}}{I_i - I_{sd}} \times I_{rms} + \frac{-I_{sd} \times t_{StD1} + I_i \times t_{StD2}}{I_i - I_{sd}} \quad \dots (5)$$

$$t \geq \frac{t_{LtD1} - t_{LtD2}}{I_{sd} - I_r} \times I_{rms} + \frac{-I_r \times t_{LtD1} + I_{sd} \times t_{LtD2}}{I_{sd} - I_r} \quad \dots (6)$$



Gambar 5. Penerapan pertidaksamaan matematika pada kurva arus

Kedua garis pada Gambar 5 ini dibentuk oleh 7 (tujuh) titik yang terdiri dari 3 (tiga) titik arus (I_r , I_{sd} , I_i) dan 4 (empat) titik waktu (t_{StD1} , t_{StD2} , t_{LtD1} , t_{LtD2}). I_r adalah batas minimal arus CB untuk trip dengan waktu tunda lambat (*Long Peak Delay*), I_{sd} adalah batas arus minimal CB untuk trip dengan waktu tunda cepat (*Short Peak Delay*), dan I_i adalah batas arus minimal yang dibutuhkan CB untuk trip tanpa waktu tunda (*Instantaneous*). t_{StD1} dan t_{StD2} adalah nilai seting untuk waktu tunda yang cepat (*Short Time Delay*), sementara t_{LtD1} dan t_{LtD2} adalah nilai seting untuk waktu tunda yang lambat (*Long Time Delay*).

Ada 2 (dua) garis lainnya yang menjadi batas *trip*, yaitu garis yang dibentuk sepanjang batas I_{sd} dan garis yang dibentuk sepanjang batas I_i . Maka keseluruhan terdapat 4 (empat) batas yang menjadi patokan dalam pemetaan arus I_{rms} . Untuk tujuan ini maka dibangun algoritma sebagai berikut:

1. Uji apakah I_{rms} melebihi I_i . Jika melebihi maka *trip* dan berikan tanda "*Instantaneous*", jika tidak maka pindah ke pengecekan selanjutnya.
2. Uji apakah titik $\{I_{rms}, t\}$ memenuhi Persamaan 5 dan $I_{rms} \geq I_{sd}$. Jika melebihi maka *trip* dan berikan tanda "*Short Circuit*", jika tidak maka pindah ke pengecekan selanjutnya
3. Uji apakah titik $\{I_{rms}, t\}$ memenuhi Persamaan 6 dan $t \geq t_{LtD1}$. Jika melebihi maka *trip* dan berikan tanda "*Overload*", jika tidak maka kembali pada subrutin perhitungan nilai RMS arus.

Kedua algoritma di atas pada penerapannya digabungkan sehingga algoritma pemetaan masuk ke dalam algoritma perhitungan waktu tunda trip. Peletakan algoritma pemetaan terdapat pada saat $I_{rms} \geq I_r$ saja. Skala yang digunakan dalam penelitian ini adalah skala logaritmik dengan basis 10 dimana berbeda dengan skala kartesius biasa. Oleh karena itu, variabel-variabel dalam algoritma pemetaan di atas harus diubah dulu ke dalam skala logaritmik dengan melakukan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Variabel logaritmik} = {}^{10}\log(\text{variabel}) \times {}^{10}\log(e) \quad \dots(7)$$

Dimana e adalah nilai konstanta dari basis logaritma natural, sebesar 2,71828.

3. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

3.1. Pengujian internal sistem

3.1.1. Pengujian catu daya

Pengujian ini dilakukan terhadap regulator +5 V dan +9 V dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil pengujian catu daya

No	Tipe Regulator	Hasil Pengukuran	Tingkat Kesalahan
1	L7805CV	4,96 Volt	0,8 %
2	L7805CV	4,93 Volt	1,4 %
3	L7805CV	4,96 Volt	0,8 %
4	L7809CV	9,01 Volt	0,1 %
5	L7809CV	8,86 Volt	1,5 %
6	L7809CV	8,96 Volt	0,4 %

Pada Tabel 1 dapat dilihat hasil pengukuran terhadap rangkaian catu daya. Komponen regulator L7805CV (yang meregulasi tegangan +5 V) dan komponen regulator L7809CV (yang meregulasi tegangan +9 V) bekerja dengan baik walaupun dengan tingkat kesalahan tertentu (untuk regulator +5 V rata-rata sebesar 1%, dan untuk regulator +9 V rata-rata sebesar 0,63%).

3.1.2. Pengujian ADC mikrokontroler

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari blok konversi Analog ke Digital pada mikrokontroler. Berikut hasil pengujiannya:

Tabel 2. Hasil pengujian ADC mikrokontroler

No	Tegangan Input	ADC Seharusnya	ADC yang Terbaca	Tingkat Kesalahan
1	1,477 Volt	317	316	0,24 %
2	1,326 Volt	284	283	0,38 %
3	1,519 Volt	326	325	0,24 %
4	1,297 Volt	278	277	0,42 %
5	0,635 Volt	136	135	0,89 %

Hasil pengujian ADC diperlihatkan pada Table 2. Pengujian ini juga menghasilkan kesimpulan yang sama, dengan rata-rata tingkat kesalahan sebesar 0,47%. Pada saat pengujian ini, V_{cc} terukur sebesar 4,77 V. Untuk kasus input tegangan sebesar 1,477 Volt, perhitungan dilakukan sebagai berikut:

$$ADC = (V_{in} \div V_{cc}) \times 1023$$

$$\Leftrightarrow (1,477 \div 4,77) \times 1023 = 317$$

Sementara itu, ADC yang terbaca oleh mikrokontroler sebesar 316, maka tingkat kesalahannya adalah 0,24 %.

3.1.3. Pengujian pembacaan sensor arus ACS714

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui tingkat presisi dari pembacaan arus oleh sensor arus ACS714. Berikut hasil pengujiannya:

Tabel 3. Hasil pengujian pembacaan sensor arus ACS714

No.	Jumlah Lampu Pijar (100 W)	Arus Terukur Kalibrasi (A)	Tegangan ACS714 (mV)	LCD	Tingkat Kesalahan (%)
1	1	0,37	28	0,370	0
2	2	0,76	53	0,764	0
No.	Jumlah Lampu Pijar (100 W)	Arus Terukur Kalibrasi (A)	Tegangan ACS714 (mV)	LCD	Tingkat Kesalahan (%)
3	3	1,16	79	1,168	0
4	4	1,56	106	1,570	0,64
5	5	1,96	134	1,960	0

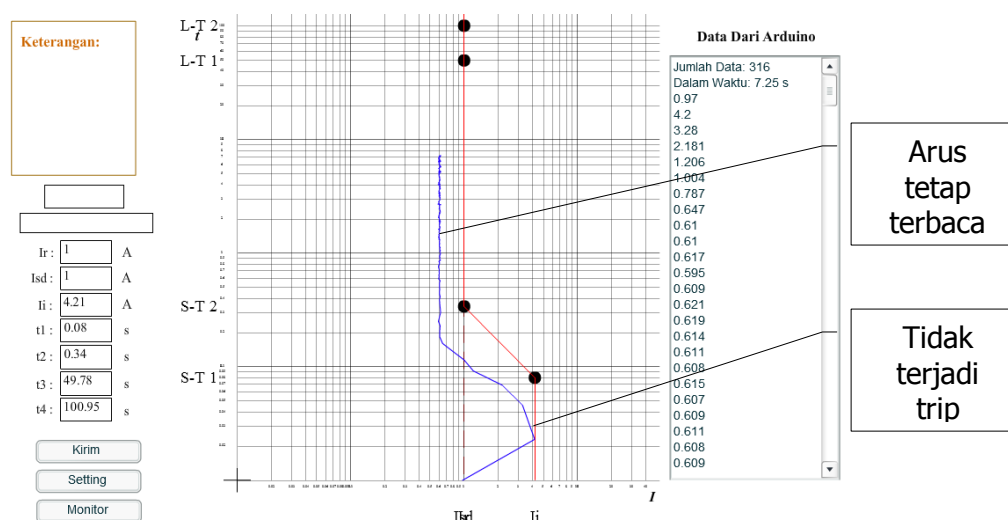
Tabel 3 memperlihatkan hasil pengujian pembacaan arus oleh ACS714. Pada pengujian pembacaan arus oleh sensor ACS714 ketika tidak ada arus yang mengalir, LCD menampilkan tulisan 0.001 A. Ketika ada arus yang mengalir, sensor ini mengubah besaran arus menjadi besaran tegangan secara proporsional. Tingkat sensitivitas sensor arus ACS 714 adalah sebesar 66 mV/A, artinya ada jarak sebesar 66 mV x 30 A = 1,98 V untuk arus hingga 30 A. Sementara itu, Vcc terukur sebesar 4,96 V, maka satu tingkat dalam ADC sebesar 4,96 V : 1024 = 4,8 mV. Maka tingkat presisi dari ACS714 hingga 4,8 mV : 66 mV = 72 mA.

3.2. Pengujian sistem secara keseluruhan

3.2.1. Pengujian arus *inrush*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah sistem dapat melewati arus *inrush* yang terjadi saat pengasutan motor ataukah tidak. Pengujian ini dilakukan terhadap motor induksi 3 fasa 1 Hp yang dihubung secara Y (bintang).

Dari pengujian yang dilakukan, dapat diketahui bahwa alat bekerja dengan baik. Ketika terjadi arus *inrush*, penyetelan *setting point instantaneous* dilakukan di atas arus *inrush* sehingga motor induksi bekerja tanpa berhenti berputar karena *trip-off* pembatas arus. Ini membuktikan bahwa alat dapat membedakan arus *inrush* dari arus gangguan.



Gambar 6. Tampilan hasil pengujian arus inrush ke-1

Gambar 6 memperlihatkan hasil salah satu pengujian sistem terhadap arus inrush, yaitu pengujian ke-1. Tampilan menggunakan bantuan sebuah software untuk memperlihatkan hasil rekaman perubahan arus selama sekitar 10 detik. Pada Gambar 6 terlihat grafik dengan

garis berwarna merah merupakan gambaran karakteristik kurva trip alat pembatas arus, sedangkan grafik berwarna biru merupakan gambaran hasil rekaman pembacaan arus. Pada pengujian ke-1, waktu trip dengan waktu tunda yang cepat dari 0,08 detik (t_{STD1}) hingga 0,34 detik (t_{STD2}). Jika terjadi kesalahan trip pada CB (*nuisance trip*) akibat arus *inrush*, seharusnya perekaman sudah berhenti pada waktu maksimal 0,34 detik (t_{STD2}). Tampilan hasil pengujian ke-1 memperlihatkan bahwa perekaman arus motor berakhir pada detik 7,25 detik, dengan demikian sistem dapat melewati arus *inrush* sehingga motor tetap berputar.

3.2.2. Pengujian pada keadaan beban lebih (*overload*)

Pengujian ini bertujuan untuk menguji alat apakah dapat memproteksi beban dengan memutus jaringan pada waktu tunda tertentu. Proses pengujian dilakukan pada beban resistif, yaitu lampu pijar dengan variasi jumlah tertentu.

Pengujian diawali dengan memberikan *setting* parameter pada alat yaitu:

I_r	= 2,05 A	t_2	= 0,01 s
I_{sd}	= 19,779 A	t_3	= 2,08 s
I_i	= 19,779 A	t_4	= 8,70 s
t_1	= 0,01 s		

Proses yang dilakukan adalah menyalakan satu persatu lampu pijar sementara pada waktu yang sama, mikrokontroler merekam besaran arus yang terjadi selama pembebanan. Hasil dari perekaman tersebut ditampilkan dengan bantuan *software* Macromedia Flash.

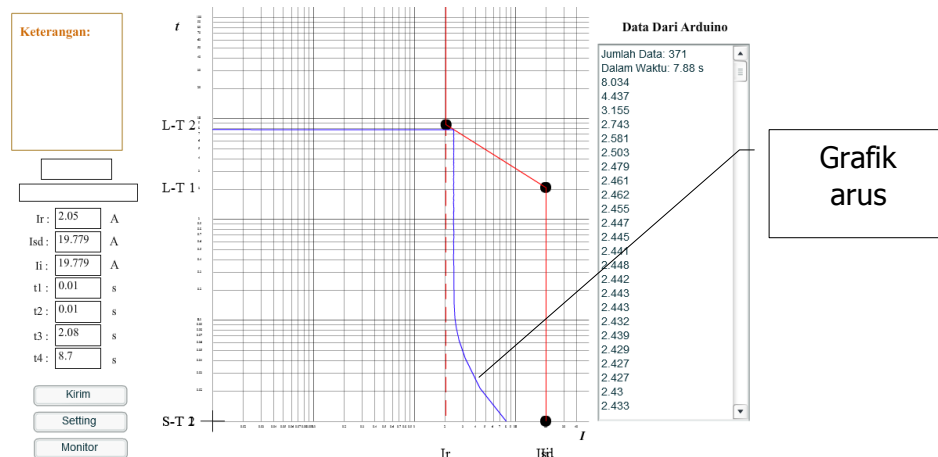
Tabel 4. Hasil pengujian beban lebih

No	Jumlah Lampu Pijar (100 W)	Arus pada alat (A)	Apakah Trip?	Waktu Trip (s)	Waktu delay trip menurut perhitungan (s)	Kesalahan waktu Δt (s)
1	1	0,366	tidak	-	-	-
2	2	0,782	tidak	-	-	-
3	3	1,200	tidak	-	-	-
4	4	1,616	tidak	-	-	-
5	5	2,025	tidak	-	-	-
6	6	2,435	ya	7,880	7,804	0,076
7	7	2,853	ya	7,156	7,061	0,095
8	8	3,237	ya	6,576	6,520	0,056
9	9	3,649	ya	6,099	6,045	0,054
10	10	4,048	ya	5,728	5,662	0,066

Table 4 memperlihatkan hasil pengujian beban lebih. Pada beban terpasang di bawah 600 Watt, sistem tidak trip, sementara pada beban terpasang di atas 600 Watt, sistem trip dengan waktu tunda tertentu.

Adapun hasil rekaman arus untuk pengujian ke-6 adalah sebagai berikut:

trip



Gambar 7. Tampilan hasil pengujian beban lebih dengan beban 600 Watt

Gambar 7 memperlihatkan hasil pengujian beban lebih yang ke-6. Pada percobaan dengan dengan asumsi pada beban 600 Watt (6 lampu), terlihat pada table 4 pemutusan jaringan listrik setelah 7,88 detik. Pemutusan ini dapat diperlihatkan pada Gambar 7 dengan grafik berwarna biru yang melintang horizontal sebagai tanda bahwa terjadi transien arus hingga mendekati nol. Hal ini karena arus melebihi nilai arus nominal alat, yaitu sebesar 2,435 A. Berdasarkan hasil perhitungan maka waktu yang dibutuhkan untuk *trip* adalah selama 7,804 detik. Tingkat kesalahan sebesar 0,076 detik.

Adapun proses perhitungan waktu tunda pada arus sebesar 2,435 A adalah sebagai berikut:

- a. Pengubahan nilai *setting* alat dan nilai arus RMS ke dalam skala logaritmik. Setiap nilai *setting* dan arus RMS diubah menjadi skala miliampere dan milidetik terlebih dahulu, maka persamaannya adalah:

$$\text{Variabel logaritmik} = {}^{10}\log(\text{variabel} \times 1000) \times {}^{10}\log(e) \quad \dots (8)$$

Tabel. 5. Hasil pengubahan nilai *setting* dan Irms dalam skala biasa ke dalam skala logaritmik

Variabel	Nilai	Nilai dalam skala logaritmik	Nama variabel baru
I_r	2,05 A	3,311	$\text{Log}I_r$
I_{sd}	19,779 A	4,296	$\text{Log}I_{sd}$
I_i	19,779 A	4,296	$\text{Log}I_i$
t_1	0,01 s	1	$\text{Log}t_1$
t_2	0,01 s	1	$\text{Log}t_2$
t_3	2,08 s	3,318	$\text{Log}t_3$
t_4	8,70 s	3,939	$\text{Log}t_4$
I_{rms}	2,435 A	3,386	$\text{log}I_{rms}$

- b. Memasukan nilai-nilai pada Tabel 5 ke dalam Persamaan 6 untuk mengetahui waktu tunda pada arus 2,435. Nilai yang dihasilkan berupa nilai dalam skala logaritmik.

$$\text{Log}t = \frac{\text{Log}t_3 - \text{Log}t_4}{\text{Log}I_{sd} - \text{Log}I_r} \times \text{Log}I_{rms} + \frac{-\text{Log}I_r \times \text{Log}t_3 + \text{Log}I_{sd} \times \text{Log}t_4}{\text{Log}I_{sd} - \text{Log}I_r} \quad \dots (9)$$

$$\text{Log}t = \frac{3,318 - 3,939}{4,296 - 3,311} \times 3,386 + \frac{-3,311 \times 3,318 + 4,296 \times 3,939}{4,296 - 3,311} = 3,892$$

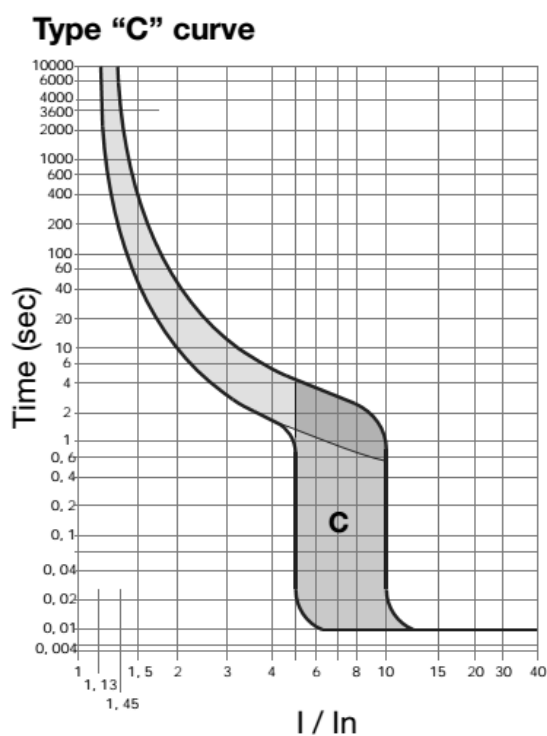
- c. Mengubah nilai waktu tunda ke skala biasa dengan menjadikan nilai $\text{Log}t$ pangkat dari 10. Satuan dari hasil pengubahan $\text{Log}t$ ini adalah milidetik, seperti contoh berikut:

$$t = 10^{\text{Log}t} = 10^{3,892} = 7804 \text{ milidetik} = 7,804 \text{ detik}$$

3.2.3. Pengujian pada keadaan hubung singkat (*short circuit*)

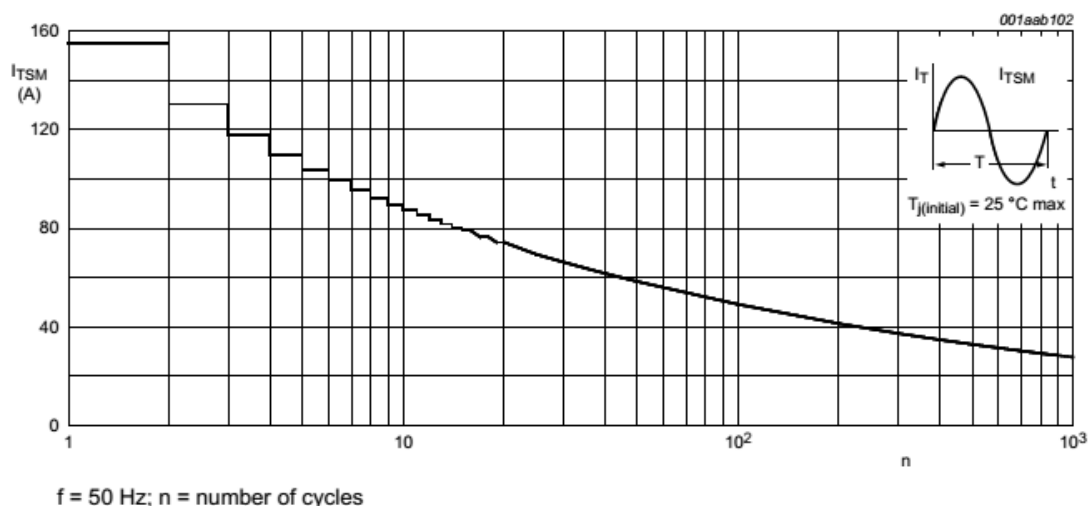
Pada pengujian ini, sistem tidak mampu membatasi arus hubung singkat dengan memutus jaringan dan akhirnya gangguan tetap terjadi. Pada pengujian ini, terjadi kegagalan percobaan dan sistem terlambat untuk memutus jaringan. Terjadi kerusakan pada sensor arus ACS714 dan TRIAC BT139-600E. Penyebab kegagalan ini diperkirakan karena beberapa penyebab sebagai berikut:

- Karakteristik kerja komponen TRIAC yang akan berhenti mengalirkan arus apabila polaritas tegangan di kedua kaki dibalikkan. Oleh karena itu, walaupun jika trigger dihentikan oleh mikrokontroler ATmega328, maka TRIAC akan tetap mengalirkan arus selama setengah siklus tegangan belum berakhir yakni 10 milidetik (untuk sistem 50 Hertz) atau 8,3 milidetik (untuk sistem 60 Hertz).
- Batas toleransi transien arus lebih dari sensor arus ACS 714 yang diperbolehkan (I_p) sebesar 100 A dengan 1 pulsa selama 100 milidetik dan TRIAC BT139-600 sebesar 155 A. Arus yang dimasukkan pada percobaan ini memiliki besaran di luar batas ambang toleransi tersebut dengan kenaikan transien yang tinggi, hal ini dapat dibuktikan melalui MCB yang *trip*.



Gambar 8. Kurva trip dari MCB yang dipakai pada pengujian

Karakteristik kurva *trip* MCB ini dapat dilihat pada Gambar 8 (Hager, 2012). MCB dengan merk HAGER MY 325 C mempunyai karakteristik kurva trip jenis "C". MCB ini mempunyai waktu instantaneus pada kurva trip di atas antara 5 – 10 kali I_n yaitu antara 125 A hingga 250 A. Ketika pengujian hubung singkat (*short circuit*) pada sistem, MCB ini *trip*, hal ini membuktikan bahwa arus yang mengalir melewati sistem melebihi dari 125 A.



Gambar 9. Fungsi arus puncak tidak-berulang vs jumlah siklus arus sinusoidal

Pada Gambar 9 dapat dilihat kurva batas maksimal BT139-600E. Kurva ini menyatakan bahwa BT139 memiliki batas selama sekitar dua siklus (± 40 milidetik) ketika arus melebihi 125 A. Maka untuk pengujian hubung singkat, sistem tidak dapat mengatasi arus yang mengalir melaluinya dan tidak dapat mencegah dari arus hubung singkat yang terjadi pada jaringan listrik.

3. KESIMPULAN

Dari keseluruhan perancangan, implementasi, dan pengujian sistem dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pada pengujian terhadap bagian-bagian sistem memperlihatkan bahwa bagian-bagian sistem dapat bekerja dengan baik. Kesalahan pengujian rangkaian catu daya untuk regulator 5V rata-rata sebesar 1%, dan untuk regulator 9V rata-rata sebesar 0,63%. Pengujian ADC (*Analog to Digital Converter*) juga menghasilkan kesimpulan yang sama, dengan rata-rata tingkat kesalahan sebesar 0,47%. Pada pengujian pembacaan arus melalui sensor ACS714 oleh mikrokontroler ATmega328 dengan modul Arduino Uno, menghasilkan kesalahan sebesar 0,13%. Untuk menambah keakuratan dalam pembacaan arus ini sebaiknya tegangan referensi untuk pin *Analog* (AREF) mikrokontroler ATmega328 diambil dari sumber tegangan V_{cc} sensor ACS714.
2. Pada pengujian sistem secara keseluruhan, sistem diuji dalam 3 (tiga) kondisi, yaitu: arus *inrush*, beban lebih (*overload*), dan hubung singkat (*short circuit*). Pada pengujian dalam keadaan arus *inrush*, sistem dapat membedakan arus *inrush* dari arus gangguan, sehingga beban listrik dapat tetap menyala. Pada pengujian beban lebih (*overload*), sistem dapat memutuskan jaringan listrik pada waktu yang telah ditentukan sesuai nilai *setting* yang diberikan. Pada pengujian pertama, sistem dapat menanggulangi *nuisance trip*, dan pada pengujian ke dua, sistem dapat memberikan waktu tunda untuk memutus jaringan listrik sesuai nilai *setting* waktu *trip*. Sementara pada pengujian *short circuit*, sistem tidak mampu menahan arus yang melebihi 125 Ampere dalam rentang waktu 40 milidetik. Hal ini karena batas toleransi arus lebih transien dari sensor arus ACS714 hanya 100 Ampere dalam waktu 100 milidetik dan batas toleransi arus BT139 sekitar 3 (tiga) siklus ketika arus melebihi 125 Ampere.

DAFTAR RUJUKAN

- Allegro MicroSystem. (2011). *ACS714, Automotive Grade, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*, Allegro MicroSystem, Inc., Massachusetts, U.S.A.
- Hager. (2012). *Protection devices the complete solution*, Hager Group.
- Kurniawan, Freddy. (2011). *Analisis Ketepatan Pengukur Nilai Tegangan dan Arus RMS Jala-Jala Listrik Berbasis Mikrokontroler ATmega8535*, Jurnal Angkasa, Vol 3, No. 2, November 2011.
- NXP N.V. (2013). *BT139-600E 4Q Triac Product data sheet*, NXP N.V.
- Sumardjati Pih, dkk. (2008). *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 1*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional.
- Square D Company. (2002). *Electronic Trip Molded Case Circuit Breakers LE, LX, LXI, ME, MX, NE, NX, PE and PX Circuit Breakers Only, Catalog No. 0602CT9201R1/02 June 2002*, Schneider Electric, U.S.A.
- Zuhal. (1995). *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.