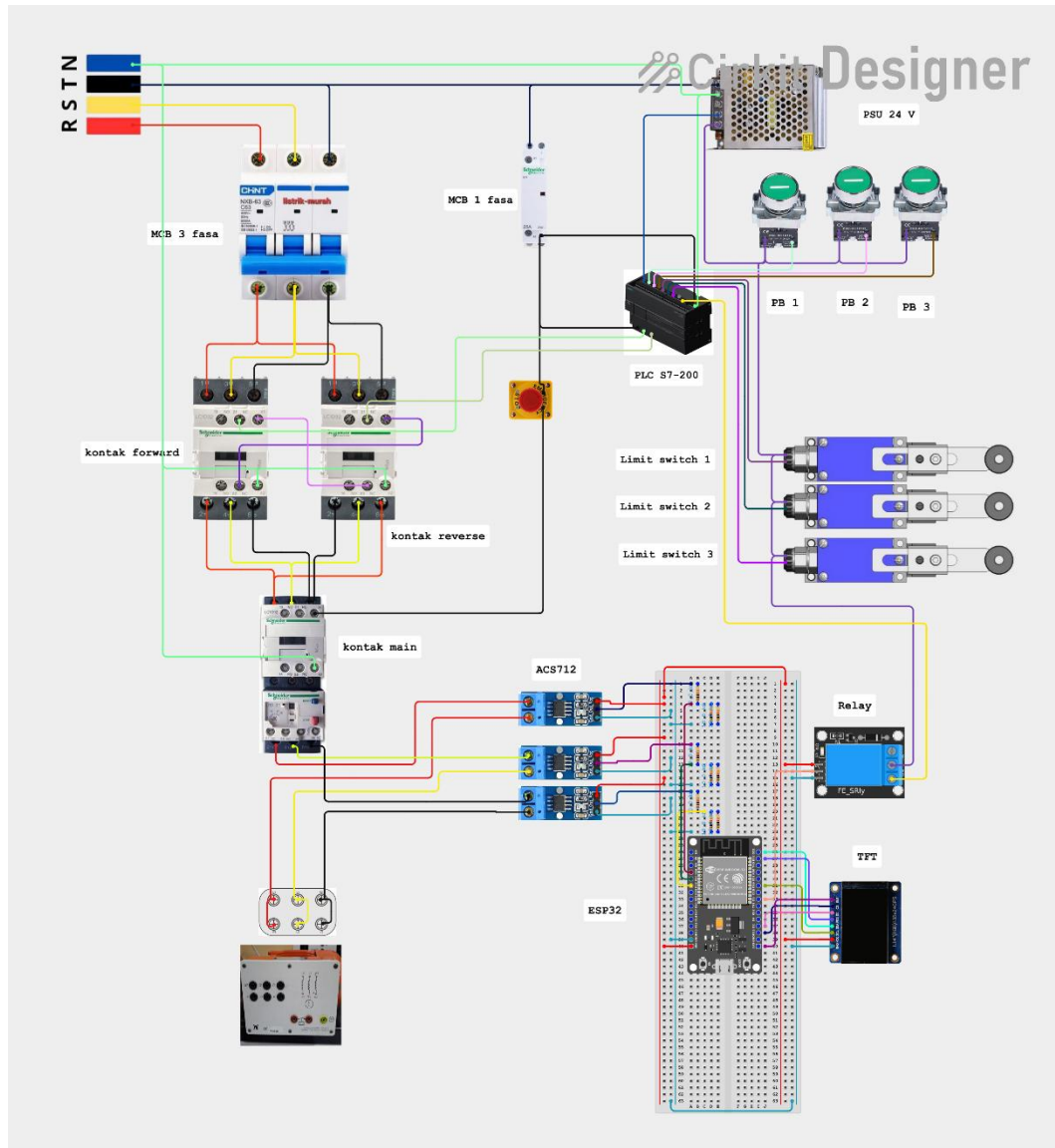


## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Perancangan dan Implementasi Sistem



**Gambar 4. 1** Implementasi Hardware Sistem

Berdasarkan Gambar 4.1, sistem pengukuran arus pada motor induksi tiga fasa telah berhasil direalisasikan sesuai dengan rancangan yang telah disusun pada tahap perancangan. Implementasi perangkat keras meliputi pemasangan tiga buah sensor arus ACS712 pada masing-masing jalur fasa motor, integrasi dengan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengolahan data, serta penambahan modul relay sebagai media komunikasi dengan sistem kontrol. Seluruh komponen dapat

terhubung dengan baik sehingga membentuk sistem pengukuran yang mampu melakukan pembacaan arus motor secara *real time*.

Pada proses implementasi, keluaran analog dari sensor ACS712 dihubungkan ke pin ADC ESP32 melalui rangkaian pembagi tegangan dengan tiga buah resistor. Rangkaian ini digunakan untuk memastikan tegangan keluaran sensor tetap berada dalam rentang pembacaan ADC ESP32 sehingga proses akuisisi data dapat berlangsung dengan aman dan stabil. Selanjutnya, faktor kompensasi diterapkan pada perangkat lunak untuk mengembalikan hasil pembacaan ke nilai tegangan sebenarnya sebelum dikonversi menjadi besaran arus. Hasil implementasi menunjukkan bahwa proses pembacaan sinyal analog berjalan dengan baik, ditandai oleh nilai arus yang dapat terbaca secara stabil tanpa mengalami gangguan akibat batas rentang tegangan ADC.

Konfigurasi ADC pada ESP32 juga berhasil diterapkan menggunakan resolusi 12-bit dengan pengaturan atenuasi yang sesuai sehingga kemampuan pembacaan sinyal analog dapat dimanfaatkan secara optimal. Konfigurasi tersebut memberikan resolusi pengukuran yang cukup tinggi untuk mendukung proses perhitungan *True RMS*, karena metode ini memerlukan data hasil sampling yang konsisten dan memiliki tingkat ketelitian yang baik. Dengan konfigurasi tersebut, ESP32 mampu melakukan proses akuisisi data arus secara kontinu sebagai dasar perhitungan arus RMS maupun pendeteksian karakteristik arus starting motor.

Selain berfungsi sebagai sistem pengukuran, implementasi perangkat keras juga dilengkapi dengan sistem proteksi digital berbasis relay. Relay dikendalikan oleh ESP32 berdasarkan hasil pengolahan data arus yang diperoleh dari sensor. Ketika nilai arus memenuhi kondisi yang telah ditetapkan sebagai gangguan, ESP32 akan mengaktifkan relay untuk mengirimkan sinyal ke sistem kontrol sebagai bentuk tindakan proteksi.

Sebagai antarmuka pengguna, modul TFT ST7735 berhasil diintegrasikan dengan ESP32 untuk menampilkan informasi pengukuran secara langsung. Nilai arus motor dan status operasi sistem dapat ditampilkan secara *real time*, sehingga kondisi motor dapat dipantau tanpa memerlukan komputer atau perangkat lunak tambahan. Kehadiran modul tampilan ini tidak hanya memudahkan proses pengujian, tetapi juga meningkatkan kemudahan observasi selama sistem beroperasi.

## **4.2 Hasil Pengujian Sistem**

### **4.2.1 Hasil Pengujian Akurasi Sensor ACS712**

Pengujian akurasi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sensor ACS712 dalam mengukur arus RMS motor induksi tiga fasa pada *prototype* lift barang. Pengujian dilaksanakan dengan memberikan beban konstan sebesar 4 kg, kemudian hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan hasil pengukuran menggunakan clamp meter Aneng CM86 Digital sebagai alat ukur acuan. Pengujian

dilakukan sebanyak tiga kali pada kondisi operasi yang sama untuk mengetahui tingkat ketelitian dan konsistensi pembacaan sensor. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.1 sebagai berikut:

**Tabel 4. 1** Hasil Pengujian Akurasi Arus

| Percobaan | Clamp Meter<br>(A) | ACS712 (A) | Error (%) |
|-----------|--------------------|------------|-----------|
| 1         | 0,680              | 0,661      | 2,79      |
| 2         | 0,680              | 0,668      | 1,76      |
| 3         | 0,680              | 0,664      | 2,35      |
| Rata-rata | 0,680              | 0,664      | 2,30      |

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa rata-rata pembacaan sensor ACS712 adalah sebesar 0,664 A, sedangkan nilai referensi dari clamp meter sebesar 0,680 A. Hasil pengujian pada penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pengukuran arus yang dibangun menggunakan sensor ACS712, rangkaian pembagi tegangan, ESP32, dan metode perhitungan *True RMS* memiliki rata-rata kesalahan pengukuran sebesar 2,3% terhadap clamp meter. Nilai ini sedikit lebih besar dibandingkan spesifikasi datasheet sensor ACS712. Perbedaan tersebut masih wajar karena hasil pengujian merepresentasikan kinerja keseluruhan sistem pengukuran, bukan hanya karakteristik IC sensor, sehingga dipengaruhi pula oleh proses konversi ADC, rangkaian pengkondisi sinyal, algoritma pengolahan data, serta kondisi pengujian.

Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan pada Jurnal Elkolind [22], yang melaporkan bahwa sensor ACS712 menghasilkan rata-rata *error* sebesar 1,68% dengan *error* maksimum 3,6% dibandingkan clamp meter. Penelitian tersebut menyatakan bahwa nilai *error* tersebut masih dapat ditoleransi dan tidak mengganggu kinerja sistem pembacaan sensor arus. Dengan demikian, rata-rata *error* sebesar 2,3% yang diperoleh pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang sebanding dengan hasil penelitian sebelumnya, sehingga sistem pengukuran dinilai memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk aplikasi pemantauan dan proteksi arus motor induksi tiga fasa.

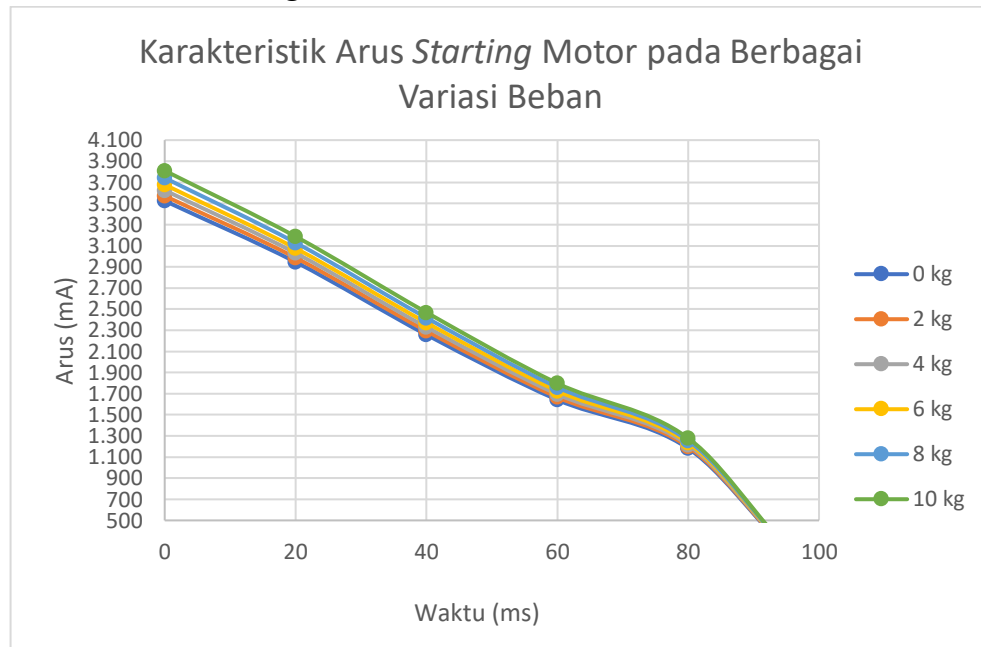
## 4.2.2 Hasil Pengujian Arus *Starting*

### 4.2.2.1 Pengaruh Variasi Beban Terhadap Arus *Starting*

Pengujian karakteristik arus *starting* dilakukan untuk mengetahui respons arus motor induksi tiga fasa pada saat awal beroperasi hingga mencapai kondisi tunak (*steady state*). Pengujian ini bertujuan untuk mengidentifikasi besarnya arus awal (*inrush current*) yang muncul sesaat setelah motor dihidupkan, waktu yang dibutuhkan motor untuk mencapai kondisi operasi stabil, serta pengaruh pembebanan terhadap karakteristik tersebut. Proses pengukuran dilakukan menggunakan tiga buah sensor arus ACS712 yang dipasang pada masing-masing

fasa motor dan diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32. Data arus direkam secara *real time* dengan interval pengambilan sampel setiap 20 ms, sehingga perubahan arus selama proses percepatan motor dapat diamati secara rinci.

Pada pengujian ini, variasi pembebanan diberikan mulai dari 0 kg hingga 10 kg dengan interval 2 kg, sedangkan parameter yang diamati meliputi nilai arus *starting*, waktu *starting*. Data hasil pengukuran kemudian disajikan dalam bentuk kurva karakteristik arus terhadap waktu untuk setiap variasi beban. Melalui penyajian tersebut, dapat dianalisis hubungan antara penambahan beban dengan karakteristik arus *starting* motor.



**Gambar 4. 2** Karakteristik Arus *Starting* Motor saat Variasi Beban

Pada Gambar 4.2 ini dapat dilihat bahwasannya hasil pengujian menunjukkan bahwa pada seluruh variasi pembebanan, motor selalu mengalami lonjakan arus (*inrush current*) pada saat pertama kali diberi tegangan. Arus tersebut kemudian mengalami penurunan secara cepat hingga mencapai nilai arus RMS yang relatif konstan. Fenomena ini sesuai dengan karakteristik motor induksi sangkar tupai, dimana pada kondisi rotor masih diam ( $slip = 1$ ), impedansi rotor sangat kecil sehingga arus yang mengalir menjadi besar. Seiring meningkatnya kecepatan putar rotor, nilai slip menurun sehingga arus motor berangsur-angsur turun menuju kondisi *steady state*.

Dengan adanya variasi pembebanan dari 0-10 kg memperlihatkan bahwa semakin besar pembebanan yang diberikan pada lift, nilai puncak arus *starting* cenderung meningkat. Pada kondisi tanpa beban, arus *starting* berada pada kisaran sekitar 3,5 A, sedangkan pada pembebanan maksimum mencapai lebih dari 3,8 A. hasil pengujian karakteristik arus *starting* menunjukkan bahwa motor mengalami lonjakan arus sesaat hingga sekitar 3,5–3,8 A atau sekitar 5,3 kali arus *steady state*, Walaupun demikian, peningkatan tersebut tidak terlalu signifikan dibandingkan



perubahan beban yang diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem transmisi worm gearbox dengan rasio 1:30 menghasilkan torsi keluaran yang cukup besar sehingga penambahan beban hingga 10 kg masih berada dalam kapasitas kerja motor.

#### 4.2.2.2 Pengaruh Perpindahan Lantai Terhadap Arus *Starting*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh arah pergerakan lift terhadap karakteristik arus *starting* motor induksi tiga fasa. Pada pengujian ini beban dijaga konstan sebesar 6 kg, sedangkan variabel yang diubah adalah arah perpindahan lift, yaitu lantai 1 menuju lantai 2, lantai 2 menuju lantai 3, lantai 1 menuju lantai 3, lantai 3 menuju lantai 2, lantai 2 menuju lantai 1, dan lantai 3 menuju lantai 1. Dengan menjaga beban tetap konstan, perubahan karakteristik arus yang terjadi dapat dikaitkan secara langsung dengan pengaruh arah gerak serta gaya gravitasi terhadap sistem penggerak lift. Hasil pengujian dari variasi perpindahan lantai terhadap arus *starting* motor dapat dilihat pada Tabel 4.2 sebagai berikut:

**Tabel 4. 2** Pengujian Variasi Perpindahan Lantai

| No | Pergerakan Lift | Arah  | Arus <i>Starting</i> (A) | Waktu <i>Starting</i> (ms) | Arus RMS (A) | Waktu Motor Menyala (s) |
|----|-----------------|-------|--------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|
| 1  | Lantai 1 → 2    | Naik  | 3,678                    | 80                         | 0,684        | 9,56                    |
| 2  | Lantai 2 → 3    | Naik  | 3,721                    | 80                         | 0,687        | 9,48                    |
| 3  | Lantai 1 → 3    | Naik  | 3,806                    | 100                        | 0,691        | 19,22                   |
| 4  | Lantai 3 → 2    | Turun | 3,604                    | 60                         | 0,680        | 9,11                    |
| 5  | Lantai 2 → 1    | Turun | 3,586                    | 60                         | 0,681        | 9,06                    |
| 6  | Lantai 3 → 1    | Turun | 3,580                    | 80                         | 0,683        | 18,73                   |

Berdasarkan hasil pengujian, arus *starting* pada pergerakan naik berada pada rentang 3,6 – 3,8 A, sedangkan pada pergerakan turun berada pada rentang 3,6-3,5 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pergerakan ke atas memerlukan arus *starting* yang sedikit lebih besar dibandingkan pergerakan ke bawah. Hal ini disebabkan motor harus menghasilkan torsi elektromagnetik yang lebih besar untuk mengatasi gaya gravitasi pada saat awal percepatan. Sebaliknya, ketika lift bergerak turun, gaya gravitasi membantu arah gerak sehingga kebutuhan torsi awal menjadi lebih kecil dan arus *starting* yang mengalir juga mengalami penurunan.

#### 4.2.2.3 Analisa Karakteristik Arus *Starting* Motor

Pengujian karakteristik arus *starting* motor induksi tiga fasa pada *prototype* lift barang menunjukkan bahwa arus awal selalu mengalami lonjakan (*inrush current*) sesaat setelah motor menerima tegangan melalui metode *Direct On Line* (DOL), kemudian menurun secara bertahap hingga mencapai kondisi tunak (*steady state*). Dengan adanya variasi pembebanan dari 0-10 kg memperlihatkan bahwa

semakin besar pembebanan yang diberikan pada lift, nilai arus *starting* cenderung meningkat. Pada seluruh variasi pembebanan, arus *starting* yang diperoleh berada pada kisaran sekitar 3,5–3,8 A, sedangkan arus RMS pada kondisi *steady state* hanya berada pada rentang 0,665–0,721 A. Hal ini menunjukkan bahwa arus *starting* 5,3 kali arus kerja. Selain itu, waktu *starting* yang diperoleh relatif singkat, yaitu sekitar 80–100 ms, sehingga motor mampu mencapai kondisi stabil dalam waktu yang cepat.

Pengujian pengaruh arah pergerakan lift dengan beban konstan 6 kg juga menunjukkan adanya perbedaan karakteristik arus *starting* akibat pengaruh gravitasi. Pergerakan naik (misalnya dari lantai 1 menuju lantai 3) menghasilkan arus *starting* yang cenderung lebih tinggi dibandingkan pergerakan turun (misalnya dari lantai 3 menuju lantai 1), karena motor harus menghasilkan torsi awal yang lebih besar untuk mengatasi gaya gravitasi dan inersia sistem.

#### 4.2.3 Hasil Pengujian Arus RMS Motor

Pengujian karakteristik arus RMS motor induksi tiga fasa menggunakan sensor ACS712 yang terhubung dengan ESP32. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan arus motor selama kondisi operasi tunak (*steady state*) akibat perubahan beban serta arah pergerakan lift.

##### 4.2.3.1 Pengaruh Variasi Beban Terhadap Arus RMS Motor

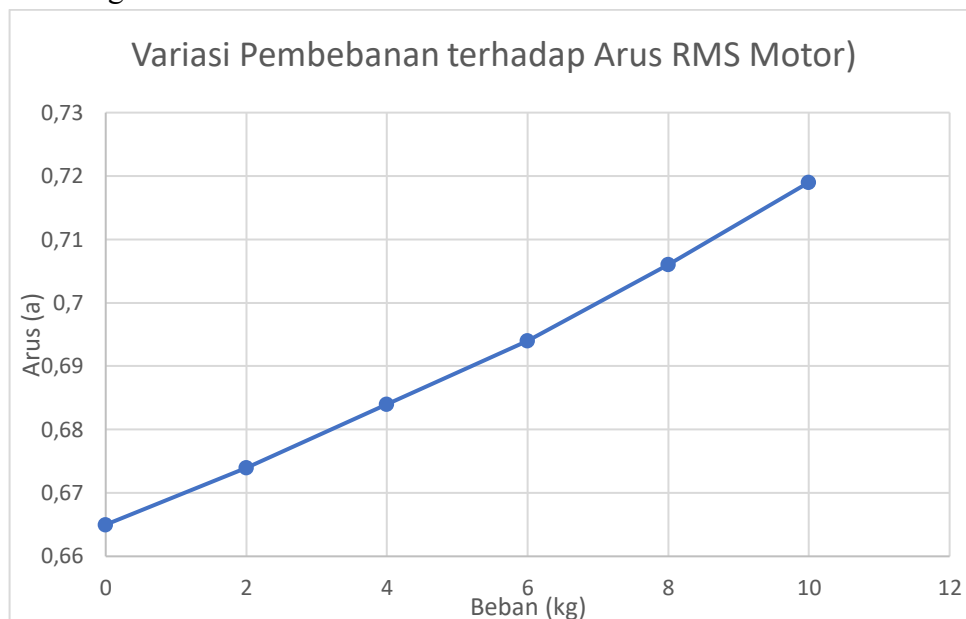
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi pembebanan terhadap besarnya arus RMS motor induksi tiga fasa pada *prototype* lift barang. Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi beban mulai dari 0 kg hingga 10 kg, sedangkan arah pergerakan lift dijaga tetap agar tidak memengaruhi hasil pengukuran. Pada setiap variasi beban dilakukan tiga kali pengujian untuk memperoleh data yang lebih representatif dan mengurangi pengaruh fluktuasi pembacaan sensor. Nilai arus RMS diukur menggunakan sensor ACS712 yang diproses oleh mikrokontroler ESP32 melalui metode perhitungan RMS secara digital, kemudian hasilnya ditampilkan pada serial monitor dan digunakan sebagai dasar dalam analisis karakteristik arus motor.

Hasil Pengujian dapat di lihat pada Tabel 4.3 sebagai berikut:

**Tabel 4. 3** Pengaruh Variasi Beban Terhadap Arus RMS

| Beban (kg) | Percobaan 1<br>(A) | Percobaan 2<br>(A) | Percobaan 3<br>(A) | Rata-rata<br>(A) |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| 0          | 0,664              | 0,666              | 0,665              | 0,665            |
| 2          | 0,672              | 0,675              | 0,674              | 0,674            |
| 4          | 0,682              | 0,684              | 0,686              | 0,684            |
| 6          | 0,692              | 0,694              | 0,696              | 0,694            |
| 8          | 0,704              | 0,706              | 0,708              | 0,706            |
| 10         | 0,717              | 0,719              | 0,721              | 0,719            |

Pengujian variasi pembebanan terhadap motor ini dapat juga di lihat pada grafik sebagai berikut.



**Gambar 4. 3** Pengaruh Variasi Pembebanan Terhadap Arus RMS Motor

Dari grafik tersebut akan terlihat bahwa arus RMS meningkat secara bertahap seiring bertambahnya beban yang diangkat oleh lift. Pada kondisi tanpa beban, arus RMS rata-rata sebesar 0,665 A, sedangkan pada beban maksimum 10 kg meningkat menjadi 0,719 A. Kenaikan ini menunjukkan bahwa motor memerlukan arus yang lebih besar untuk menghasilkan torsi yang mampu mengatasi pertambahan beban mekanik.

Namun demikian, kenaikan arus tersebut relatif kecil, yaitu hanya sekitar 0,054 A atau sekitar 8,1% dari kondisi tanpa beban. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi beban 0–10 kg masih berada pada rentang operasi yang ringan dibandingkan kemampuan nominal motor induksi 0,27 kW dengan arus nominal 1 A. Selain itu, keberadaan worm self-locking gearbox dengan rasio 1:30 dan *sprocket* rantai 14:35 memberikan keuntungan mekanis yang besar sehingga motor tidak mengalami peningkatan beban listrik yang signifikan meskipun massa angkut bertambah.

#### 4.2.3.2 Pengaruh Perpindahan Lantai Terhadap Arus RMS

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh arah pergerakan lift terhadap karakteristik arus RMS motor induksi tiga fasa. Pada pengujian ini beban dijaga konstan sebesar 6 kg, sedangkan variabel yang diubah adalah arah perpindahan lift, yaitu lantai 1 menuju lantai 2, lantai 2 menuju lantai 3, lantai 1 menuju lantai 3, lantai 3 menuju lantai 2, lantai 2 menuju lantai 1, dan lantai 3 menuju lantai 1. Dengan menjaga beban tetap konstan, perubahan karakteristik arus yang terjadi dapat dikaitkan secara langsung dengan pengaruh arah gerak serta gaya

gravitasi terhadap sistem penggerak lift. Hasil pengujian dari variasi perpindahan lantai terhadap arus RMS motor dapat dilihat pada Tabel 4.4 sebagai berikut:

**Tabel 4. 4** Pengujian Variasi Perpindahan Lantai

| No | Pergerakan Lift | Arah  | Arus<br><i>Starting</i><br>(A) | Waktu<br><i>Starting</i><br>(ms) | Arus<br>RMS (A) | Waktu<br>Motor<br>Menyala<br>(s) |
|----|-----------------|-------|--------------------------------|----------------------------------|-----------------|----------------------------------|
| 1  | Lantai 1 → 2    | Naik  | 3.678                          | 80                               | 0.684           | 9,56                             |
| 2  | Lantai 2 → 3    | Naik  | 3.721                          | 80                               | 0.687           | 9,48                             |
| 3  | Lantai 1 → 3    | Naik  | 3.806                          | 100                              | 0.691           | 19,22                            |
| 4  | Lantai 3 → 2    | Turun | 3.604                          | 60                               | 0.680           | 9,11                             |
| 5  | Lantai 2 → 1    | Turun | 3.586                          | 60                               | 0.681           | 9,06                             |
| 6  | Lantai 3 → 1    | Turun | 3.580                          | 80                               | 0.683           | 18,73                            |

Berdasarkan hasil pengujian, arus RMS pada pergerakan naik berada pada rentang 0,684 – 0,691 A, sedangkan pada pergerakan turun berada pada rentang 0,680 – 0,683 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pergerakan ke atas memerlukan arus RMS yang sedikit lebih besar dibandingkan pergerakan ke bawah. Hal ini disebabkan motor harus menghasilkan torsi elektromagnetik yang lebih besar untuk mengatasi gaya gravitasi pada saat awal percepatan. Sebaliknya, ketika lift bergerak turun, gaya gravitasi membantu arah gerak sehingga kebutuhan torsi awal menjadi lebih kecil dan arus RMS yang mengalir juga mengalami penurunan.

#### 4.2.3.3 Analisa Karakteristik Arus RMS Motor

Pengujian untuk melihat Karakteristik arus RMS pada motor di lakukan 2 buah pengujian, yaitu pengaruh variasi pembebanan dan pengaruh variasi perpindahan lantai terhadap arus RMS motor. Pada pengujian variasi pembebanan, nilai arus RMS mengalami peningkatan secara bertahap dari 0,665 A pada beban 0 kg menjadi 0,719 A pada beban 10 kg. Kenaikan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar beban yang diangkat, semakin besar pula torsi yang harus dihasilkan motor induksi sehingga arus kerja motor meningkat. Meskipun demikian, peningkatan arus RMS relatif kecil, yaitu sekitar 0,054 A atau sekitar 8,1% dari kondisi tanpa beban. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan gearbox worm 1:30 mampu memperbesar torsi keluaran sehingga perubahan beban tidak menyebabkan kenaikan arus motor yang signifikan.

Sementara itu, pada pengujian pengaruh variasi perpindahan lantai dengan beban tetap 6 kg, nilai arus RMS berada pada rentang 0,684–0,691 A untuk seluruh arah pergerakan, baik naik maupun turun. Selisih maksimum yang hanya mencapai 0,007 A menunjukkan bahwa arah putaran motor maupun jarak perpindahan lift tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap arus RMS selama beban yang



diangkat tetap sama. Perbedaan kecil tersebut lebih disebabkan oleh fluktuasi pembacaan sensor, toleransi pengukuran, serta perubahan kondisi mekanis sesaat seperti gesekan rel, rantai, dan gearbox. Dapat disimpulkan bahwa arus RMS merepresentasikan kondisi operasi tunak (*steady state*) dan lebih dipengaruhi oleh besarnya beban daripada arah maupun jarak perpindahan lift.

#### 4.2.4 Hasil Pengujian Proteksi Arus Lebih

Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi keandalan sistem monitoring berbasis ESP32 dalam mendeteksi kondisi arus lebih dan mengeksekusi tindakan proteksi (memutuskan aliran listrik melalui relay). Selain itu, pengujian ini dilakukan untuk membandingkan karakteristik dan respon waktu proteksi digital berbasis ESP32 dengan *Thermal Overload Relay* (TOR) konvensional yang sebelumnya digunakan pada sistem lift. Pengujian dilakukan dengan menambahkan gaya eksternal dengan menahan putaran motor.

Pada program ESP32, ambang batas arus proteksi (*trip point*) ditetapkan pada nilai 1,2 A sesuai dengan arus nominal motor 1 A. Toleransi waktu (*time delay*) diberikan selama 2000 ms (2 detik) untuk mencegah *false tripping* akibat lonjakan arus *starting* yang bersifat sementara.

Data hasil pengujian simulasi kondisi *overload* mekanis sebanyak 10 kali percobaan disajikan pada Tabel 4.5.

**Tabel 4. 5** Hasil Pengujian Respon Proteksi Arus Lebih

| No.              | Arus (RMS) (A) | Relay ESP32 (Trip / Tidak) | Waktu Respon Relay ESP32 (ms) | TOR Konvensional (Trip / Tidak) | Waktu Respon TOR Konvensional (detik) |
|------------------|----------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1                | 1,520          | Trip                       | 2.080                         | Trip                            | 19,8                                  |
| 2                | 1,640          | Trip                       | 2.060                         | Trip                            | 18,5                                  |
| 3                | 1,780          | Trip                       | 2.050                         | Trip                            | 17,2                                  |
| 4                | 1,890          | Trip                       | 2.070                         | Trip                            | 16,1                                  |
| 5                | 2,050          | Trip                       | 2.040                         | Trip                            | 15,0                                  |
| 6                | 2,180          | Trip                       | 2.050                         | Trip                            | 14,2                                  |
| 7                | 2,300          | Trip                       | 2.060                         | Trip                            | 13,0                                  |
| 8                | 2,420          | Trip                       | 2.040                         | Trip                            | 12,1                                  |
| 9                | 2,510          | Trip                       | 2.050                         | Trip                            | 11,4                                  |
| 10               | 2,580          | Trip                       | 2.030                         | Trip                            | 10,8                                  |
| <b>Rata-rata</b> | <b>2,087</b>   | <b>Trip</b>                | <b>2.053</b>                  | <b>Trip</b>                     | <b>14,8</b>                           |

Berdasarkan Tabel 4.5, seluruh variasi arus yang diberikan berhasil dideteksi oleh kedua sistem proteksi, ditunjukkan dengan kondisi trip pada relay ESP32 maupun TOR konvensional pada seluruh pengujian. Hal ini menunjukkan

bahwa sistem proteksi digital yang dikembangkan telah mampu menjalankan fungsi dasar proteksi arus lebih sebagaimana proteksi konvensional. Perbedaannya terletak pada karakteristik waktu respon yang dihasilkan. Relay ESP32 menunjukkan waktu respon yang relatif konstan pada kisaran 2,03–2,08 detik, dengan rata-rata sebesar 2,053 detik. Karakteristik tersebut sesuai dengan metode *fixed time delay*, di mana relay akan bekerja setelah arus melebihi batas yang telah ditentukan selama waktu tunda yang telah diprogram, sehingga waktu trip tidak dipengaruhi oleh besarnya arus gangguan.

Sebaliknya, TOR konvensional menunjukkan karakteristik respon yang berbeda. Semakin besar arus yang mengalir, semakin singkat waktu yang dibutuhkan TOR untuk melakukan trip. Waktu respon berkurang dari 19,8 detik pada arus 1,520 A menjadi 10,8 detik pada arus 2,580 A, dengan rata-rata waktu respon sebesar 14,8 detik. Karakteristik ini sesuai dengan prinsip kerja *inverse time*, yaitu waktu trip berbanding terbalik dengan besarnya arus lebih. Perbedaan tersebut disebabkan oleh mekanisme kerja TOR yang menggunakan elemen bimetal, di mana peningkatan arus menghasilkan pemanasan yang lebih cepat sehingga mempercepat proses trip.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa proteksi digital berbasis ESP32 mampu memberikan respon yang lebih cepat dan konsisten dibandingkan TOR konvensional pada rentang arus yang diuji. Meskipun demikian, kedua sistem memiliki karakteristik kerja yang berbeda. Proteksi digital pada penelitian ini menggunakan metode *fixed time delay* yang menghasilkan waktu trip tetap, sedangkan TOR menggunakan karakteristik *inverse time* yang menyesuaikan waktu trip terhadap besarnya arus. Oleh karena itu, penelitian ini tidak bertujuan menggantikan prinsip kerja TOR, melainkan menunjukkan bahwa proteksi digital berbasis ESP32 dapat menjadi alternatif sistem proteksi yang fleksibel, memiliki waktu respon yang dapat diprogram sesuai kebutuhan, dan mampu menjalankan fungsi proteksi arus lebih secara efektif pada *prototype* lift barang yang dikembangkan.

#### 4.2.5 Analisa Karakteristik Arus Terhadap Evaluasi MCB

Motor induksi tiga fasa yang digunakan memiliki arus nominal sebesar 1 A, sedangkan hasil pengukuran menunjukkan bahwa arus RMS selama kondisi tunak berada pada rentang 0,665–0,719 A. Selain itu, hasil pengujian karakteristik arus *starting* menunjukkan bahwa motor mengalami lonjakan arus sesaat hingga sekitar 3,5–3,8 A atau sekitar 5,3 kali arus *steady state*, dengan durasi *starting* berkisar antara 80–100 ms sebelum kembali menuju kondisi tunak. Karakteristik tersebut merupakan fenomena normal pada motor induksi akibat kebutuhan arus yang besar untuk menghasilkan torsi awal dan mempercepat putaran rotor.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, pemilihan MCB tidak dapat dilakukan hanya dengan mempertimbangkan arus nominal motor, tetapi juga harus memperhatikan karakteristik arus *starting* agar tidak terjadi nuisance tripping, yaitu

kondisi ketika MCB trip pada saat proses *starting* meskipun sistem masih beroperasi secara normal. Dari hasil analisis diperoleh bahwa penggunaan MCB tiga fasa dengan rating 2 A telah memenuhi kebutuhan proteksi karena nilai tersebut masih berada di atas arus operasi normal motor, namun tetap cukup sensitif untuk mendeteksi kondisi arus lebih maupun hubung singkat.

Selanjutnya, berdasarkan karakteristik kurva trip MCB, tipe C dipilih sebagai proteksi yang paling sesuai. MCB tipe C memiliki karakteristik pelepasan instan pada kisaran 5–10 kali arus nominal MCB, sehingga masih mampu menahan lonjakan arus *starting* motor yang hanya berlangsung singkat tanpa menyebabkan trip yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, penggunaan MCB 3 fasa tipe C dinilai paling sesuai untuk sistem lift barang yang dikembangkan karena mampu memberikan keseimbangan antara keandalan operasi motor dan efektivitas sistem proteksi terhadap gangguan arus lebih maupun hubung singkat.

