

**ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN ARUS *STARTING* *SOFT STARTER*
PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA DI
PT KRAKATAU TIRTA INDUSTRI**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi syarat kelulusan Mata Kuliah Seminar dan salah satu syarat menempuh Sarjana Strata (S1)



Disusun oleh:

ARI KURNIAWAN

NPM. 3332200094

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
2025**

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : Analisis Ketidakseimbangan Arus *Starting Soft Starter* Pada Motor Induksi 3 Fasa Di PT Krakatau Tirta Industri
Nama Mahasiswa : Ari Kurniawan
NPM : 3332200094
Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggung jawabkan. Apabila dikemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Serang, 9 Januari 2025



ARI KURNIAWAN
NPM.3332200094

LEMBAR PENGESAHAN

Dengan ini ditetapkan bahwa skripsi berikut:

Judul : Analisis Ketidakseimbangan Arus *Starting Soft Starter* Pada Motor Induksi 3 Fasa Di PT Krakatau Tirta Industri
Nama Mahasiswa : Ari Kurniawan
NPM : 3332200094
Fakultas / Jurusan : Teknik / Teknik Elektro

Telah diuji dan dipertahankan pada tanggal 9 Januari 2025 melalui Sidang Skripsi di Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa Cilegon dan dinyatakan LULUS.

Dewan Penguji

Tanda Tangan

Pembimbing I : Dr. Ir. Wahyuni Martiningsih, M.T

.....

Pembimbing II : Adi Nugraha, S.Pd., MT

.....

Penguji I : HM. Hartono, S.T., M.T

.....

Penguji II : Felycia M.T

.....

Mengetahui,

Ketua Jurusan



Dr. Eng. Rocky Alfanz, S.T., M.Sc.

NIP.1981032282010131001

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan Rahmat serta Hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan penulisan laporan skripsi dengan judul “Analisis Ketidakseimbangan Arus *Starting Soft Starter* Pada Motor Induksi Tiga Fasa Di PT Krakatau Tirta Industri”. Penulisan laporan bertujuan untuk memenuhi mata kuliah skripsi dan sebagai salah satu syarat menembuh Sarjana Strata 1 (S1) di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Laporan Skripsi ini disusun sebagai bentuk hasil penelitian yang sudah dilaksanakan bahwa dalam penyusunan skripsi ini banyak bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini ingin menyampaikan rasa terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga besar yang sudah memberikan dukungan baik secara moral dan materi.
2. Bapak Dr. Eng. Rocky Alfanz, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Bapak Dr. Siswo Wardoyo, S.T., M.Eng selaku Pembimbing akademik.
4. Ibu Dr. Ir. Wahyuni Martiningsih, M.T, selaku Pembimbing pertama Skripsi.
5. Bapak Adi Nugraha, S.Pd., MT, selaku Pembimbing kedua Skripsi.
6. Bapak Danang selaku Kadis Perencanaan Teknis serta jajaran staf PT Krakatau Tirta Industri. Bapak Hafiz selaku kepala teknisi serta teknisi Bapak Ridwan dan jajaran teknisi lainnya yang sudah membantu dalam hal pengambilan data.

Dalam pembuatan saya menyadari bahwa laporan Skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Akhir kata, penulis memohon maaf apabila terdapat kekeliruan di dalam penulisan laporan ini. Semoga laporan Skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca pada umumnya.

Cilegon, 9 Januari 2025


Ari Kurniawan

ABSTRAK

Ari Kurniawan

3332200094

ANALISIS KETIDAKSEIMBANGAN ARUS *STARTING SOFT STARTER* PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA PT KRAKATAU TIRTA INDUSTRI

Pada PT Krakatau Tirta Industri ditemukan ketidakseimbangan arus *starting* dan tingginya arus *starting* pada motor 71M1 dengan arus tertinggi sebesar 6.277 A. Apabila hal tersebut dibiarkan dalam jangka waktu yang cukup lama maka dapat menyebabkan usia pakai motor menjadi lebih singkat bahkan dapat mengalami kerusakan. Metode pengambilan data menggunakan *power quality analyzer fluke 438-II* berupa arus *starting* dan mekanikal *analyzer* dari motor 71M1. Kemudian dilakukan perhitungan dan simulasi menggunakan simulink matlab dengan parameter-parameter alat eksisting. Identifikasi faktor ketidakseimbangan arus *starting* berupa *firing angle thyristor soft starter* dan impedansi motor 71M1 yang kurang baik. Dengan mengatur *firing angle soft starter* pada simulink matlab di fasa R dan T yang lebih kecil dibandingkan fasa S, arus *starting* R dan T menjadi lebih besar dibandingkan S. Kemudian resistansi rotor dan stator dapat berpengaruh terhadap lonjakan arus *starting*. Pengubahan *firing angle* pada *soft starter* simulink dengan fasa R dan T 30° sedangkan fasa S 90°, fasa R dan T memiliki arus sekitar 6.200 A sedangkan fasa S 2.830 A. Pengubahan resisitansi rotor dan stator yang lebih kecil terbukti memberikan dampak lonjakan arus yang lebih besar yaitu sekitar 9.104 A.

Kata Kunci: Motor Induksi, Soft Starter, Arus Tidak Seimbang.

ABSTRACT

Ari Kurniawan

3332200094

ANALYSIS OF STARTING CURRENT UNBALANCE OF SOFT STARTER ON THREE PHASE INDUCTION MOTOR PT KRAKATAU TIRTA INDUSTRI

PT Krakatau Tirta Industri, there is an unbalance in starting current and high starting current in motor 71M1 with the highest current of 6,277 A. If this is left for a long period of time, it can cause the motor's life to be shorter and can even be damaged. The method of data collection uses a fluke 438-II power quality analyzer in the form of starting current and mechanical analyzer from motor 71M1. Then the calculation and simulation using simulink matlab with the parameters of the existing equipment. Identification of the starting current unbalance factor in the form of firing angle thyristor soft starter and motor impedance 71M1 is not good. By adjusting the firing angle of the soft starter in simulink matlab in the R and T phases which are smaller than the S phase, the starting current of R and T becomes greater than S. Then the rotor and stator resistance can affect the starting current surge. Changing the firing angle on the simulink soft starter with the R and T phases 30 degrees while the S phase is 90 degrees, the R and T phases have a current of about 6,200 A while the S phase is 2,830 A. Changing the rotor and stator resistances smaller proved to have a greater current surge impact of about 9,104 A.

Keywords: Induction Motor, Soft Starter, Current Unbalance.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PRAKATA.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Batasan Masalah.....	3
1.6. Sistematika Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Motor Induksi Tiga Fasa	5
2.2. Struktur Motor Induksi Tiga Fasa	5
2.2.1. Stator	6
2.2.2. Rotor.....	7
2.2.3. Celah Udara atau <i>Air Gap</i>	9
2.3. Prinsip Kerja Motor Induksi.....	10
2.5. Starting Pada Motor Induksi.....	16
2.6. Soft Starter.....	18
2.7. Kajian Pustaka	20

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	24
3.1. Metode Penelitian.....	24
3.2. Diagram Alir Penelitian.....	26
3.3. Komponen Penelitian	27
3.4. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	30
BAB IV HASIL DAN ANALISIS.....	31
4.1. Hasil Pengukuran	31
4.2. Hasil Perhitungan	36
4.3. Hasil Simulasi Simulink Matlab.....	38
4.4. Analisa Hasil	40
4.4.1. Dampak Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Arus <i>Starting</i> ...	40
4.4.2. Dampak <i>Firing Angle</i> Terhadap Arus <i>Starting</i>	42
4.4.3. Dampak Resistansi Motor 71M1 Terhadap Arus <i>Starting</i>	45
BAB V PENUTUP.....	49
5.1. Kesimpulan.....	49
5.2. Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN A	45
DOKUMENTASI PENELITIAN	45
LAMPIRAN B	45
DATA SPESIFIKASI KOMPONEN.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur motor induksi tiga fasa [14].	6
Gambar 2.2 Stator pada motor induksi tiga fasa [17].	7
Gambar 2.3 Rotor sangkar pada motor induksi [17].	8
Gambar 2.4 Rotor belitan motor induksi [17].	8
Gambar 2.5 Celah Udara atau air gap pada motor induksi [17].	9
Gambar 2.6 Rating kondisi motor dari parameter mekanikal.	10
Gambar 2.7 Medan putar pada motor induksi [20].	11
Gambar 2.8 Rangkaian dasar soft starter [25].	18
Gambar 2.9 Time Voltage Ramp [24].	19
Gambar 3.1 Diagram Alir penelitian.	26
Gambar 3.2 Rangkaian Soft Starter Motor 71M1.	28
Gambar 3.3 Power quality analyzer fluke 438-II [18].	29
Gambar 3.4 Parameter setting PQA.	29
Gambar 3.5 Pengaturan firing angle.	30
Gambar 4.2 Cara pengambilan data.	32
Gambar 4.3 Grafik Tegangan dan Arus.	32
Gambar 4.4 Rangkaian Soft Starter Simulink Matlab.	38
Gambar 4.5 Grafik Arus Starting 71M1.	39
Gambar 4.6 Pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap arus.	41
Gambar 4.8 Arus starting tidakseimbang.	44
Gambar 4.9 Parameter Mekanis.	45
Gambar 4.11 Pengaturan Resistansi Rendah.	46
Gambar 4.13 Pengaturan Resistansi Tinggi.	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konversi Sudut Penyalaan	15
Tabel 2.2 NEMA <i>code letter</i>	16
Tabel 4.1 Data Kenaikan Arus Starting Motor 71M1 Terhadap Waktu.	33

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Saat ini beberapa negara sudah sangat memperhatikan penggunaan energi listrik yang efisien, yaitu penghematan dari segi energi maupun biaya. Hampir 70% energi yang dihasilkan oleh pembangkit dikonsumsi oleh motor listrik. Penggunaan motor induksi pada industri dan pabrik lebih hemat biaya dibandingkan motor DC dan motor sinkron, salah satu kelebihanannya adalah perawatannya yang mudah dan efisiensinya yang tinggi. Penggunaan motor induksi pada mesin-mesin industri sangat dibutuhkan untuk pengaturan kecepatan. Motor induksi mengkonsumsi 90-95% dari total energi yang dikonsumsi oleh motor listrik, yaitu sekitar 53% dari total konsumsi energi listrik. Motor induksi banyak digunakan sebagai penggerak listrik untuk berbagai industri, seperti sistem kontrol gerak industri dan untuk menggerakkan berbagai mesin, seperti pompa, kipas angin, kompresor, konveyor, spindle dan lain-lain.

Pada umumnya motor induksi dapat dioperasikan dengan menghubungkan motor secara langsung ke rangkaian *supply* motor atau dengan menggunakan tegangan yang diturunkan ke motor pada saat *starting*. Keterbatasan penggunaan motor induksi tiga fasa adalah pada saat pengasutan, dimana motor membutuhkan arus yang lebih besar, yaitu kurang lebih 5 sampai 7 kali arus pengasutan, sehingga menyebabkan terjadinya penurunan tegangan pada sistem yang dapat mengganggu peralatan lainnya [1]. Tingginya arus *starting* dapat dikurangi dengan menggunakan berbagai metode *starting*, seperti metode tahanan maju, metode Y- Δ , metode autotransformator, dan metode *soft starter* [2]. Dari banyaknya jenis pengontrolan yang dapat diterapkan pada pengontrolan motor listrik sangat tergantung kepada kerja motor yang diinginkan. Salah satu pengontrolan motor induksi yaitu dengan pengasutan *Soft Starter*.

Hal yang menjadi masalah pada motor induksi adalah pada saat *starting*, motor induksi menarik arus yang relatif tinggi. Penyebab arus *start* yang besar ini adalah nilai impedansi total yang kecil dan besarnya *Locked Rotor Current* (LRC%). Selain itu, alasan tingginya arus *start* pada motor adalah karena motor

listrik membutuhkan torsi awal yang besar untuk melawan inersia dan inersia bebannya sejak dimatikan [3]. Saat *start*, reaktansi rotor tinggi karena slip motor sama dengan satu. Nilai R_r/s meningkat seiring dengan berkurangnya slip [4]. Selain itu, hal ini dapat menyebabkan gangguan penurunan tegangan pada bus di sekitar motor *starting* [5].

Ketika sebuah motor induksi dihubungkan dengan jaringan yang besar, maka motor induksi akan menarik arus *start* yang sangat besar pula pada jaringan tersebut, sehingga jumlah total arus yang mengalir akan menyebabkan peningkatan drop tegangan pada jaringan sistem utamanya [6]. Selain itu, dapat menyebabkan gangguan jatuh tegangan pada bus-bus di sekitar motor *starting* [7]. Permasalahan pada motor induksi adalah pada saat pengasutan, dimana motor induksi menarik arus *start* yang cukup besar [8]. Metode *soft starter* secara bertahap dapat mengurangi arus start motor yang tidak menyebabkan tekanan termal pada belitan motor dan mengurangi kerusakan pada peralatan mekanis [9]. Arus *start* yang tinggi dapat menyebabkan penurunan tegangan pada saluran, sehingga mengganggu peralatan lain yang terhubung ke jalur yang sama, kualitas daya meningkat karena peralatan sistem tenaga jauh lebih sensitif terhadap masalah kualitas daya daripada peralatan seperti motor induksi [10][8].

Ketidakseimbangan arus di PT Krakatau Tirta Industri bermula dari adanya ketidakstabilan dalam distribusi daya listrik pada sistem operasional perusahaan yaitu pada motor induksi 71M1. Ketidakseimbangan ini berpotensi menimbulkan efisiensi energi yang rendah, peningkatan biaya operasional, serta risiko kerusakan peralatan listrik. Oleh sebab itu dibutuhkan identifikasi akar permasalahan ini dan menerapkan solusi yang tepat guna menjaga keberlanjutan operasional dan meningkatkan efisiensi energi di PT Krakatau Tirta Industri.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya tentang ketidakseimbangan arus *starting Soft Starter* pada motor induksi di PT Krakatau Tirta Industri memiliki rumusan masalah seperti berikut:

1. Mengapa terjadi ketidakseimbangan arus *starting* pada motor induksi saat menggunakan *soft starter* di PT Krakatau Tirta Industri?

2. Bagaimana pengaruh ketidakseimbangan arus *starting* terhadap kinerja motor induksi di PT Krakatau Tirta Industri?
3. Bagaimana solusi untuk mengatasi ketidakseimbangan arus *starting* pada motor induksi PT Krakatau Tirta Industri?

1.3. Tujuan Penelitian

Pada penelitian ini memiliki beberapa tujuan penelitian yang diharapkan dapat tercapai yaitu sebagai berikut:

1. Dapat menganalisis penyebab ketidakseimbangan arus *starting* pada motor induksi saat menggunakan *soft starter* di PT Krakatau Tirta Industri?
2. Dapat menentukan dampak ketidakseimbangan arus *starting* terhadap motor induksi menggunakan *soft starter* di PT Krakatau Tirta Industri?
3. Dapat mengusulkan solusi untuk mengatasi ketidakseimbangan arus *starting* pada motor induksi saat menggunakan *soft starter* di PT Krakatau Tirta Industri?

1.4. Manfaat Penelitian

Berikut adalah beberapa manfaat yang diharapkan pada penelitian ini sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan evaluasi yaitu:

1. Memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang arus *starting* dalam sistem *soft starter*.
2. Dapat mengidentifikasi masalah ketidakseimbangan arus *starting* motor induksi.
3. Menyediakan opsi atau pemilihan untuk mengidentifikasi dan mengatasi masalah ketidakseimbangan arus *starting*.

1.5. Batasan Masalah

Pada penelitian ini membahas tentang ketidakseimbangan arus *starting Soft Starter* pada motor induksi di PT Krakatau Tirta Industri, agar penelitian dapat terfokus serta maksimal maka terdapat batasan masalah seperti berikut ini:

1. Pelaksanaan penelitian pada motor induksi yang digunakan sebagai motor *water pump* atau motor pompa air.

2. Analisis data pada motor induksi di PT Krakatau Tirta Industri hanya berupa spesifikasi alat yang digunakan, tegangan dan arus *starting*.
3. Usulan solusi untuk ketidakseimbangan arus *starting* hanya berupa opsi penanggulangan atau pencegahan pemeliharaan motor.

1.6. Sistematika Penelitian

Dalam penulisan skripsi ini terdiri dari 5 bab, adapun isi setiap bab yang dijelaskan sebagai berikut.

BAB I Pendahuluan

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang permasalahan yang ada di PT Krakatau Tirta Industri tentang ketidakseimbangan arus *starting soft starter* motor induksi 3 fasa, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian dan sistematika penelitian.

BAB II Tinjauan Pustaka

Berisi tentang berisi tentang dasar-dasar teori mengenai seputar motor induksi, arus *starting*, *soft starter*, peran *thyristor* dan pengaturan *firing angle*, penyebab serta dampak ketidakseimbangan arus *starting*, dll.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini berisikan tentang penjelasan mengenai metode yang digunakan, peralatan penelitian, pengumpulan data, *flowchart* penelitian, data motor induksi serta tempat lokasi dan waktu penelitian dilaksanakan.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini berisi tentang pembahasan data dan Analisa penelitian yang didapatkan dari hasil penelitian dan pengolahan data yang diperoleh untuk mendapatkan indikasi ketidakseimbangan arus *starting* serta mencari solusi alternatif dari hasil analisa.

BAB V Penutup

Bab ini berisi hasil berupa kesimpulan serta saran bagi para pembaca untuk kemudian dijadikan bahan referensi ataupun penelitian lebih lanjut tentang motor induksi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

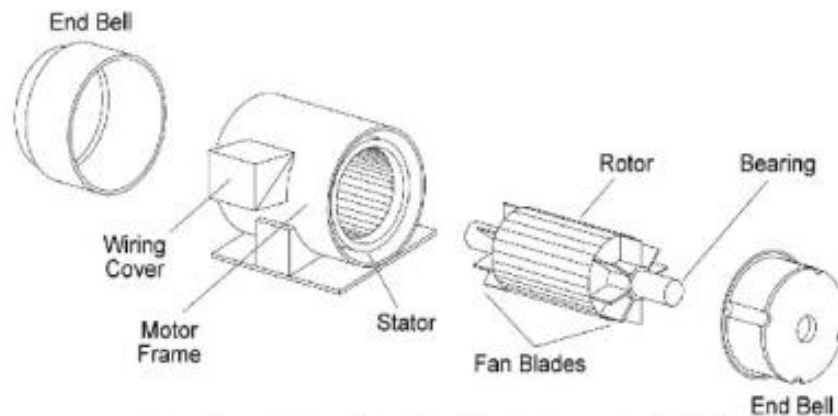
2.1. Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa adalah komponen listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, dengan arus yang dikonversi menjadi tiga fasa. Motor induksi sering juga disebut sebagai motor asinkron [11]. Motor induksi tiga fasa umumnya digunakan untuk menggerakkan peralatan di industri. Hal ini karena motor induksi tiga fasa memiliki desain yang sederhana, murah, dan mudah dirawat. Pada umumnya motor induksi tiga fasa memiliki kecepatan tanpa beban yang konstan saat kondisi tanpa beban begitupun dengan beban penuh. Kecepatan motor induksi tiga fasa bergantung pada frekuensi operasinya, sehingga membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kecepatan yang diinginkan.

Oleh karena itu perangkat kontrol frekuensi atau konverter frekuensi elektronik semakin banyak digunakan untuk mengontrol kecepatan motor induksi [12]. Terlepas dari kelebihan motor induksi tiga fasa juga memiliki kekurangan, misalnya kecepatannya tidak mudah dikontrol dan arus *start*nya dapat mencapai 5 hingga 7 kali arus nominal. Struktur motor induksi pada dasarnya terdiri dari dua bagian yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian motor yang tidak bergerak dan terdiri dari bodi motor, inti stator, belitan stator, bantalan, dan kotak terminal. Rotor adalah bagian motor yang berputar dan terdiri dari sangkar dan poros [13].

2.2. Struktur Motor Induksi Tiga Fasa

Struktur motor induksi terdiri dari dua bagian yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian motor yang tetap dan terdiri dari bodi motor, inti stator, belitan stator, bantalan, dan kotak terminal. Rotor adalah bagian motor yang berputar dan terdiri dari sangkar dan poros. Pada motor induksi tidak ada bagian rotor yang bersentuhan dengan stator. Stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara. Desain motor induksi lebih sederhana dibandingkan dengan motor DC karena tidak ada komutator atau sikat arang sehingga perawatan motor induksi hanya terdiri dari perawatan bagian mekanis. Motor induksi sangat handal dan jarang mengalami kerusakan listrik [11].

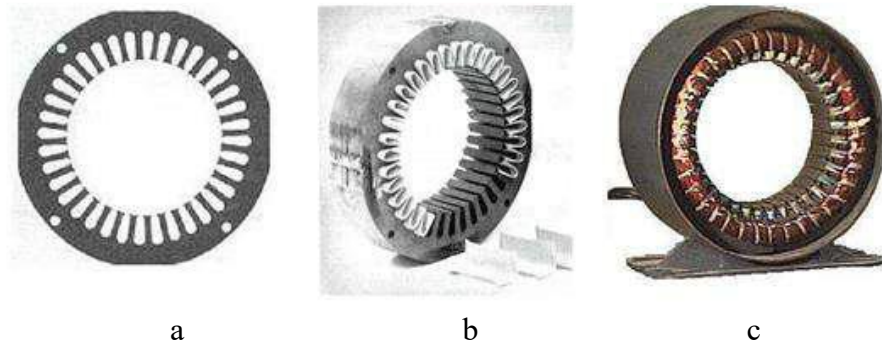


Gambar 2.1 Struktur motor induksi tiga fasa [14].

Stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit dengan jarak antara 0,4 mm dan 4 mm. Stator motor induksi terbuat dari gulungan baja bertumpuk atau berlapis-lapis untuk mengurangi rugi-rugi besi atau dengan kata lain histeresis dan eddy current yang ditimbulkan oleh medan magnet. Stator berisi beberapa slot yang menjadi tempat untuk kabel atau konduktor kumparan tiga fasa yang dikenal sebagai kumparan stator, dengan masing-masing kumparan disuplai dengan arus tiga fasa [15].

2.2.1. Stator

Stator merupakan gulungan laminasi inti yang terdapat jalur-jalur di mana kumparan silinder dililitkan. Lapisan-lapisan kumparan laminasi inti diisolasi dengan kertas. Setiap bilah inti terdiri dari lembaran besi. Setiap lempengan memiliki beberapa celah dan beberapa rongga pengikat untuk menghubungkan inti. Setiap kumparan disusun dalam slot yang disebut belitan fasa, di mana untuk motor tiga fasa belitan dipisahkan secara elektrik sebesar 120° . Kawat kumparan yang digunakan adalah kawat tembaga yang dilapisi dengan isolator tipis. Gulungan inti dan stator kemudian ditempatkan di dalam rumah silinder. Stator motor induksi tiga fasa tersebut ditunjukkan pada gambar di bawah ini [16].



Gambar 2.2 Stator pada motor induksi tiga fasa [17].

Pada gambar diatas menunjukan bahwa gambar a merupakan bagian laminasi inti dari kumparan besi. Sedangkan gambar b yaitu isolasi *slot* kumparan laminasi inti dengan kertas dan gambar c merupakan kumparan inti dan belitan stator dalam sangkar silindris [17].

2.2.2. Rotor

Rotor pada motor induksi tiga fasa terbagi menjadi 2 jenis, yaitu rotor sangkar tupai atau *squirrel cage* rotor dan rotor belitan atau *wound rotor*.

1. Rotor belitan sangkar tupai atau *Squirrel cage rotor*

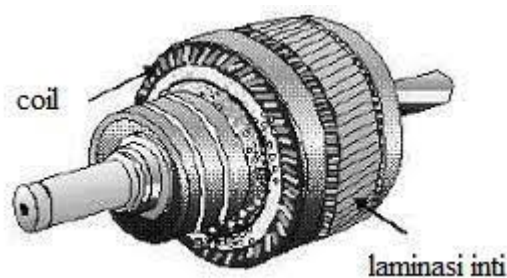
Inti rotor motor induksi sangkar tupai terdiri dari lapisan konduktor yang dipasangkan sejajar dengan poros dan mengelilingi permukaan inti. Konduktor tidak diisolasi dari inti karena arus rotor secara alami akan mengalir ke konduktor rotor dengan resistansi terendah. Di setiap ujung rotor, semua konduktor rotor dihubungkan singkat dengan cincin ujung, sehingga konduktor dan cincin rotor menyerupai sangkar tupai yang berputar, oleh karena itu dinamakan motor induksi rotor sangkar tupai. Motor induksi rotor sangkar tupai merupakan motor induksi yang banyak digunakan karena bentuknya yang sederhana, perawatannya yang mudah, dan harganya yang murah. Bentuk motor induksi rotor sangkar tupai dapat dilihat pada Gambar 2.3 [17].



Gambar 2.3 Rotor sangkar pada motor induksi [17].

2. Rotor Belitan atau *Wound Rotor*

Motor induksi dengan rotor belitan adalah motor yang mempunyai rotor yang terdiri dari belitan. Gulungan rotor tersebut didistribusikan secara seimbang dalam *slot* dan biasanya dihubungkan dalam koneksi bintang atau Y. Ketiga terminal digabungkan dengan *slip ring* dan kemudian disambungkan dengan *stationary brushes* yang merupakan sikat tetap. Agar motor induksi rotor belitan beroperasi secara normal, *stationary brushes* dihubungkan dengan hubungan pendek. Motor induksi rotor belitan jarang digunakan apabila dibandingkan dengan motor induksi sangkar tupai karena harganya yang mahal dan biaya perawatan yang lebih tinggi. Gambar motor induksi rotor belitan dapat dilihat pada gambar 2.4 [17].



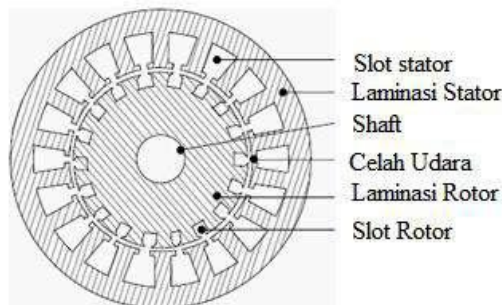
Gambar 2.4 Rotor belitan motor induksi [17].

Fungsi rangkaian bintang pada motor ini berfungsi untuk menaikkan torsi awal motor selama periode *starting*. Jika motor dioperasikan dalam keadaan normal, *slip ring* secara otomatis mengalami hubungan pendek. Dengan cara ini cincin di atas batang dihubungkan dengan menggunakan

tekanan logam dan kemudian sikat secara otomatis terangkat dari *slip ring* yang berfungsi untuk mengurangi kerugian gesekan. Selain dua bagian utama motor induksi, motor ini juga memiliki konstruksi tambahan termasuk rumah stator, penutup stator, kipas, dan koneksi terminal [17].

2.2.3. Celah Udara atau *Air Gap*

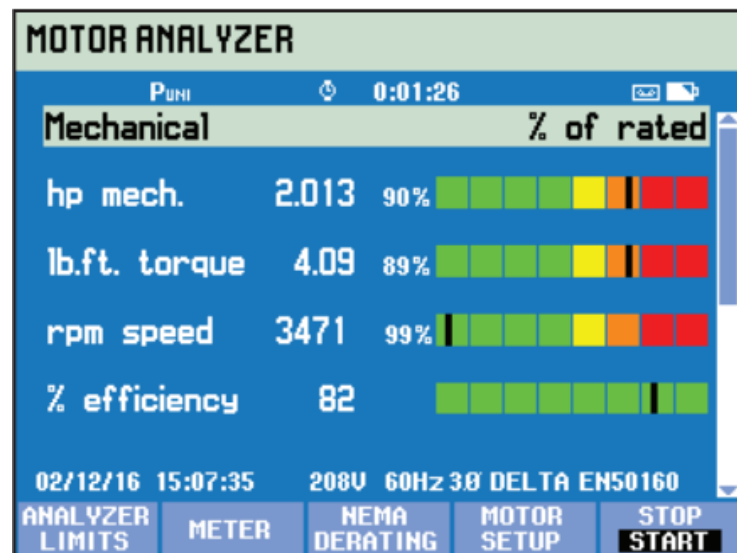
Sebagian kecil dalam motor induksi tiga fasa memiliki bagian kosong di antara stator dan rotor yang disebut celah udara atau *air gap*. Celah udara ini digunakan untuk menyalurkan energi dari stator ke rotor. Pada celah udara ini terdapat gaya magnet yang berasal dari stator yang memutar rotor sesuai dengan polaritasnya. Jarak celah udara ini harus sangat kecil untuk mengoptimalkan gaya gerak listrik yang dibutuhkan untuk memutar rotor dan harus seideal mungkin untuk dapat memisahkan jarak diantara dua komponen fisik yang berbeda yaitu stator dan rotor. Akan tetapi celah udara ini harus memiliki bentuk yang serupa karena apabila tidak serupa bentuk celah udara akan menyebabkan peningkatan kebisingan hingga getaran [17].



Gambar 2.5 Celah Udara atau *air gap* pada motor induksi [17].

Celah udara ini tidak dapat terpisah dari belitan sedangkan belitan atau gulungan terbuat dari tembaga yang telah disusun sedemikian rupa dengan hitungan yang telah ditentukan. Celah udara terletak di antara rotor dan stator di atas belitan atau kumparan [17]. Keadaan sebuah motor induksi dapat dilihat dari parameter mekanikal yang terdapat pada motor seperti kecepatan motor, torsi dan mekanikal power. Salah satu pengujian sebuah parameter mekanikal yaitu menggunakan alat ukur yang memiliki mode motor *analyzer* seperti *power quality analyzer*. Alat ini dapat mengukur sebuah parameter mekanikal dengan cara mengidentifikasi

keadaan ataupun kondisi kerusakan pada sebuah motor induksi. *Power quality analyzer* mampu menampilkan parameter mekanis seperti daya, torsi, dan kecepatan secara sekilas. Alat ini juga menunjukkan efisiensi atau rasio antara daya listrik yang disuplai dan daya mekanis yang dikirim dalam %. Pada *power quality analyzer* terdapat warna yang dapat menunjukkan performa motor dengan tingkat keparahan kerusakannya.



Gambar 2.6 Rating kondisi motor dari parameter mekanikal.

Nilai aktual untuk setiap parameter ditampilkan dalam standar yang sesuai, nilai relatifnya dalam % dari nilai terukur atau standar, dan grafik bar yang menunjukkan kinerja sistem dengan ditandai baik (hijau), cukup baik (kuning), kurang baik (oranye), dan buruk (merah).

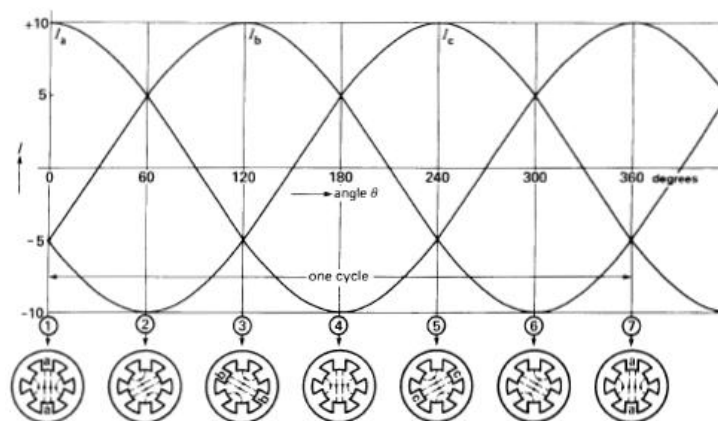
2.3. Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi beroperasi berdasarkan induksi elektromagnetik dari gulungan stator ke gulungan rotor. Ketika gulungan stator motor induksi tiga fasa dihubungkan ke sumber tegangan tiga fasa, gulungan stator akan menghasilkan gaya magnet yang berputar. Gaya magnet yang dihasilkan dari gulungan stator akan menggerakkan gulungan rotor sehingga muncul emf atau tegangan induksi. Karena konduktor atau gulungan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka arus akan mengalir pada kumparan rotor.

Penghantar gulungan rotor yang digerakkan oleh arus ini berada dalam jalur gaya magnet yang berasal dari gulungan stator, sehingga gulungan rotor akan mengalami gaya *Lorentz* yang dapat memunculkan torsi yang cenderung akan menggerakkan rotor searah dengan arah gerak medan induksi stator. Medan magnet stator yang berputar akan bersinggungan dengan konduktor rotor, menginduksi arus sehingga dengan kata lain sama dengan Hukum *Lenz*, rotor ikut berputar mengikuti medan putar stator. Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut *slip*. Dengan meningkatkan beban, kopling motor akan meningkat, yang karenanya akan meningkatkan arus induksi pada rotor, sehingga *slip* antara medan putar stator dan putaran rotor juga akan meningkat. Oleh karena itu, saat beban motor meningkat, putaran rotor cenderung menurun.

Di dalam rangka stator terdapat gulungan yang ditempatkan dalam *slot* yang dililitkan pada sebagian kutub. Jumlah kutub menentukan kecepatan putar medan stator yang diinduksikan ke rotor. Semakin tinggi jumlah kutub semakin rendah kecepatan putar medan stator dan begitupun sebaliknya. Kecepatan putar medan putar ini disebut kecepatan sinkron. Besarnya kecepatan sinkron ini adalah sebagai berikut. Ketika fasa ketiga belitan stator menerima tegangan 3 fasa yang seimbang, inti stator menghasilkan medan putar yang berotasi sesuai dengan kecepatan sinkron.

Fluktuasi berputar di sepanjang inti stator akan menggeser batang bus rotor, sehingga tegangan input di rotor akan terpengaruh. Karena batang rotor dihubungkan pendek arus rotor akan mengalir di batang rotor yang merupakan gaya rotasi rotor. Motor berotasi dengan kopling rotasi yang sama dengan gaya dikalikan dengan jari-jari atau dengan kata lain jarak dari batang konduktor ke poros [19].



Gambar 2.7 Medan putar pada motor induksi [20].

Gambar 2.7 menunjukkan pembentukan medan putar di stator motor asinkron tiga fasa. Ada dua kutub di stator, S (*South*) dan N (*North*), yang dapat dijelaskan dengan empat kondisi.

a. Kondisi 1

Jika sudutnya 0° arus listrik I1 positif, sedangkan arus listrik di I2 dan I3 negatif. Dalam hal ini gulungan V2, U1 dan W2 memiliki tanda silang (x), yang berarti arah arus menjauhi nilai yang diukur. Gulungan V1, U2 dan W1, di sisi lain memiliki titik bulat (o) yang berarti arah arus menuju nilai yang diukur. Dalam situasi ini, fluks magnetik terbentuk dalam garis horizontal dengan sudut 0° . Stator kutub S terletak di antara W1 dan V2, sedangkan stator kutub N terletak di antara V1 dan W2.

b. Kondisi 2

Jika sudutnya 120° , arus listrik I2 adalah positif, sedangkan arus listrik pada I1 dan I3 adalah negatif. Dalam hal ini gulungan W2, V1 dan U2 memiliki tanda silang (x), yang berarti arah arus keluar dari nilai yang diukur. Gulungan W1, V2 dan U1, di sisi lain, memiliki tanda titik/bulat (o), yang berarti bahwa arus mengalir ke arah pembacaan. Dalam keadaan ini, fluks magnetik terbentuk pada garis yang bergeser 120° ke kanan dibandingkan dengan garis sebelumnya. Kutub S stator berada di antara U1 dan W2, sedangkan kutub N stator berada di antara W1 dan U2.

c. Kondisi 3

Jika sudutnya 240° , arus listrik I3 adalah positif, sedangkan arus listrik di I1 dan I2 adalah negatif. Dalam hal ini gulungan U2, W1 dan V2 memiliki tanda silang (x), yang berarti arah arus meninggalkan nilai yang diukur. Gulungan U1, W2 dan V1 memiliki tanda titik/bulat (o), yang berarti arah arus searah dengan pembacaan. Dalam situasi ini, fluks magnetik pada garis bergeser 120° ke kanan atau 240° dari kondisi 1. Kutub S stator berada di antara V1 dan U2, sedangkan kutub N stator berada di antara U1 dan V2.

d. Kondisi 4

Pada sudut 360° kutub N dan kutub S stator berada pada posisi awal atau kondisi 1.

Keempat kondisi yang dijelaskan di atas dengan sudut 0° , 120° , 240° , dan 360° , dapat digunakan untuk menjelaskan pembentukan medan putar pada stator. Proses ini terus berulang selama terhubung ke sumber daya tiga fasa, sehingga rotor juga terus berputar. Karena adanya perbedaan antara medan putar pada stator dengan putaran pada rotor, motor induksi seperti ini disebut sebagai motor asinkron atau motor induksi tak serempak [20].

Kecepatan motor induksi sangat dipengaruhi oleh jumlah kutub pada stator dan frekuensi yang dihubungkan, seperti yang ditunjukkan oleh persamaan untuk menghitung kecepatan putaran medan magnet pada persamaan 2.1 di bawah ini.

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \quad 2.1$$

Keterangan pada persamaan 2.1 dimana n_s = kecepatan sinkron motor (rpm), f = frekuensi (Hz) dan p = jumlah pasang kutub. Kecepatan rotasi medan magnet yang berputar disebut sebagai kecepatan sinkron motor. Dengan catu daya frekuensi yang tetap, kecepatan sinkron setiap motor adalah konstan. Pada motor induksi yang tidak memiliki sambungan listrik ke rotor arus rotor adalah arus induksi. Konduktor rotor menghantarkan arus dalam medan magnet yang memberikan gaya pada rotor yang bergerak dalam arah tegak lurus terhadap medan. Jika belitan stator diumpankan dari sumber tiga fasa, tiga medan magnet dihasilkan yang berputar pada kecepatan yang disinkronkan. Ketika medan mengalir melalui konduktor rotor, ggl diinduksi dalam konduktor seperti halnya ggl diinduksi dalam belitan sekunder transformator oleh aliran arus primer.

Motor induksi tidak dapat berputar pada kecepatan sinkron. Bahkan jika rotor dapat mencapai kecepatan sinkron, rotor tetap diam dalam kaitannya dengan fluks yang berputar. Dalam hal ini, tidak ada tegangan yang diinduksikan pada rotor dan tidak ada arus yang mengalir dari rotor, sehingga tidak ada kopling yang terjadi. Perbedaan antara kecepatan rotor dan kecepatan sinkron *disebut* sebagai *slip*. *Slip* dapat dinyatakan dalam putaran per menit, tetapi lebih sering dinyatakan sebagai persentase dari kecepatan sinkron [20]. *Slip* dinyatakan dengan persamaan (2.2) sebagai berikut.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad 2.2$$

Keterangan pada persamaan 2.2 yaitu dimana s = slip, n_s = kecepatan sinkron (rpm) dan n_r = kecepatan rotor (rpm).

Pada motor induksi tidak ada sumber daya yang terhubung secara langsung menuju rotor sehingga daya yang melewati celah udara dapat dikatakan sama dengan daya input menuju rotor. Daya input dari motor ke stator dapat dirumuskan dalam persamaan (2.3) sebagai berikut.

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_L \times \cos \varphi \quad 2.3$$

Penjelasan pada Persamaan 2.3 adalah P_{in} = Daya input (watt), V_{LL} = Tegangan *line-to-line input* (V), I_L = Arus input per fasa (A) dan $\cos \varphi$ = Faktor daya.

Energi listrik yang mengalir melalui terminal stator diubah menjadi energi mekanik pada poros rotor dan menghasilkan torsi. Torsi adalah kemampuan motor untuk memutar beban. Besarnya torsi pada motor dirumuskan dalam persamaan (2.4) sebagai berikut.

$$T = \left(\frac{975 \times P}{n} \right) \quad 2.4$$

Keterangan pada persamaan 2.4 yaitu T = Torsi motor (Nm), P = Daya motor (Kw) dan n = kecepatan putar motor (rpm) [20].

Dalam geometri, ukuran rotasi garis yang diberikan terhadap titik awalnya disebut sudut. Garis utama disebut sisi awal, dan posisi akhir garis setelah rotasi disebut sisi akhir sudut. Titik rotasi disebut titik puncak. Sudut bernilai positif apabila arah putaran berlawanan dengan arah jarum jam, sedangkan sudut bernilai negatif jika arah rotasi searah jarum jam. Ukuran sudut adalah jumlah rotasi yang dilakukan untuk mendapatkan sisi terminal dari sisi awal. Ada banyak satuan untuk mengukur sudut, seperti ukuran derajat dan ukuran radian. Radian umumnya dipertimbangkan saat mengukur sudut fungsi trigonometri atau fungsi periodik. Radian selalu direpresentasikan dalam bentuk pi, di mana nilai pi sama dengan $\frac{22}{7}$ atau 3,14. Pengubahan radian menjadi sudut dinyatakan rumus seperti berikut:

$$Sudut = radian \times \frac{180}{\pi} \quad 2.5$$

Nilai 180° sama dengan π radian. Untuk mengonversi sudut tertentu dari ukuran radian ke derajat, nilainya harus dikalikan dengan $\frac{\pi}{180}$. Dimana nilai $\pi = \frac{22}{7}$ atau 3,14. Selain dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5, berikut adalah alternatif untuk mengetahui derajat dari sebuah radian [21]:

Tabel 2.1 Konversi Sudut Penyalaan [21].

Sudut dalam Radian	Sudut dalam Derajat
angka 0	0°
$\pi/6 = 0,524$ Rad	30°
$\pi/4 = 0,785$ Rad	45°
$\pi/3 = 1,047$ Rad	60°
$\pi/2 = 1,571$ Rad	90°
$2\pi/3 = 2,094$ Rad	120°
$5\pi/6 = 2,618$ Rad	150°
$\pi = 3,14$ Rad	180°
$7\pi/6 = 3,665$ Rad	210°
$3\pi/2 = 4,713$ Rad	270°
$2\pi = 6,283$ Rad	360°

Dapat dilihat pada tabel 2.1 bahwa konversi radian ke dalam derajat memiliki nilai yang berbeda-beda, tabel ini berfungsi untuk perhitungan ataupun nilai parameter pada simulasi simulink matlab.

2.4. Faktor Ketidakseimbangan Tegangan

Perbedaan tegangan pada masing-masing fasa akan menyebabkan arus yang bersirkulasi pada motor induksi tiga fasa akan mengalami ketidakseimbangan arus yang lebih besar pula yaitu sekitar 6 sampai 15 kali dari tegangan suplainya. Menurut standar NEMA MG-1 bahwa motor dianjurkan untuk beroperasi dalam kondisi berbeban dan memiliki ketidakseimbangan tegangan pada terminal motor tidak melebihi 1%. Sedangkan batas yang tidak diperbolehkan menurut NEMA yaitu sebesar 5% yang apabila motor beroperasi diatas nilai tersebut maka dapat mengakibatkan kerusakan pada motor induksi yang digunakan. Ketidakseimbangan tegangan menurut *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* adalah variasi tegangan dalam sebuah sistem tenaga dimana ada selisih perbedaan besaran tegangan atau sudut fasa. Sehingga ketidakseimbangan tegangan biasanya terjadi akibat sudut diantara 3 fasa yang berbeda pula. Akan tetapi besaran ketidakseimbangan tegangan menurut *National Equipment Manufacturer Association (NEMA)* dapat dinyatakan dalam bentuk *Line Voltage Unbalance Rate (LVUR)* berikut ini:

$$LVUR = \frac{\text{Besaran Deviasi Tegangan dari fasa-fasa}}{\text{Tegangan rata-rata fasa}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Pada persamaan diatas bahwa NEMA menggunakan besaran perbedaan tegangan antar fasa dan tegangan rata-rata tidak termasuk besar sudut antar fasanya.

2.5. *Starting Pada Motor Induksi*

Pada Ketika motor induksi asinkron bekerja, motor ini menarik arus yang tinggi, yang disebut sebagai *Locked Rotor Current* (LRC) dan motor induksi akan menghasilkan torsi yang secara umum disebut sebagai *Locked Rotor Torque*. Arus *start* yang tinggi juga disebabkan oleh nilai impedansi yang kecil pada saat start. Oleh karena itu, arus meningkat 5 hingga 7 kali lipat dari arus nominal selama penyalan. Hal ini dapat berdampak buruk pada sistem kelistrikan karena dapat terjadi penurunan tegangan pada busbar di sekitar motor starter. Penurunan kualitas daya ini dikenal sebagai *brownout*. Jika penurunan tegangan cukup besar, hal ini berdampak negatif pada sistem yaitu motor berhenti berputar karena tidak ada tegangan yang juga dapat memperpendek umur sistem kelistrikan dan dapat merusak sistem. Untuk menghidupkan motor induksi khususnya motor berdaya tinggi, perlu dilakukan studi terlebih dahulu untuk mengetahui efek yang terjadi saat motor dihidupkan [22]. Efek yang dapat terjadi pada saat pengasutan motor asinkron berdasarkan standar IEEE 399-1997 adalah sebagai berikut.

1. Masalah yang dapat diamati

Studi pengasutan motor harus dilakukan ketika daya motor melebihi 30% dari daya transformator. Namun, jika tidak ada generator lain yang terlibat dalam suplai, suplai dipertimbangkan ketika daya motor melebihi 10-15% dari daya generator.

2. Penurunan tegangan

Saat menghidupkan motor, tegangan pada terminal mesin harus dipertahankan pada sekitar 80% dari tegangannya atau sesuai dengan *rating* B *National Manufacturers Association* (NEMA). Arus *start* yang tinggi menyebabkan penurunan tegangan.

Arus *start* yang tinggi menyebabkan penurunan tegangan pada sistem kelistrikan dan perangkat listrik di sekitarnya. Hal ini menyebabkan nilai tegangan pada bus sistem turun. Oleh karena itu, departemen kelistrikan atau insinyur kelistrikan harus mengumpulkan data tentang motor asinkron tiga fase berdaya tinggi yang akan ditugaskan. Poin-poin berikut harus dipertimbangkan saat mengumpulkan data pada motor asinkron daya tinggi sebelum dioperasikan

1. tingkat arus rotor yang dimiliki motor. Semakin tinggi RRC, semakin tinggi arus *start*.
2. lokasi motor pada bus dengan nilai tegangan yang sesuai.
3. Jika arus start tinggi dan menyebabkan penurunan tegangan yang tidak dapat diterima, motor tidak boleh dihidupkan menggunakan metode DOL. Motor kemudian harus menggunakan metode pengasutan lain, misalnya *soft start*, VFD dan lain-lain [22].

Salah satu cara untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan mempertimbangkan atau memperhitungkan arus start motor asinkron. Penentuan arus motor induksi dapat dihitung dengan menggunakan *kode huruf* yang tertera pada motor sehingga kita dapat menentukan arus *starting* dengan mengacu pada standar NEMA berikut ini:

Tabel 2.2 NEMA *code letter* [23].

<i>Code Letter</i>	kVA/HP
A	0,0-3,15
B	2,15-3,55
C	3,55-4,0
D	4,0-4,5
E	4,5-5,0
F	5,0-5,6
G	5,6-6,3
H	6,3-7,1
J	7,1-8,0
K	8,0-9,0
L	9,0-10
M	10-11,2
N	11,2-12,5
P	12,5-14,0
R	14,0-16
S	16-18
T	18-20
U	20-22,4

Sehingga dari tabel 2.2 tersebut kita dapat menentukan arus dengan didasari dari daya semu motor dengan rumus sebagai berikut.

$$S_{start} = \text{rated horse power} \times \text{letter code} \quad 2.7$$

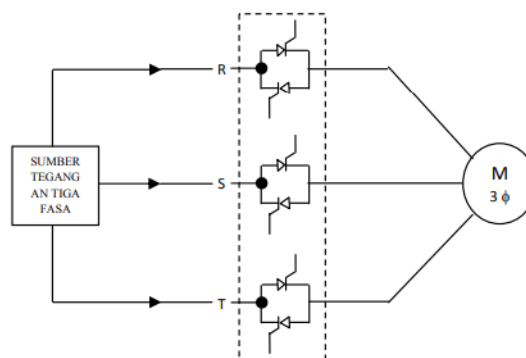
Apabila daya semu sudah didapatkan merujuk pada tabel NEMA maka kita dapat melakukan perhitungan arus *starting* dengan rumus berikut [19].

$$I_{start} = \frac{S_{start}}{3 \times V_{fasa}} \quad 2.8$$

Pada persamaan 2.8 dapat dilihat bahwa apabila sudah diketahui nilai daya semu maka dapat dihitung arus *starting*nya dengan membaginya terhadap fasa sistem yang kemudian didapatkan arus *starting* pada perhitungan.

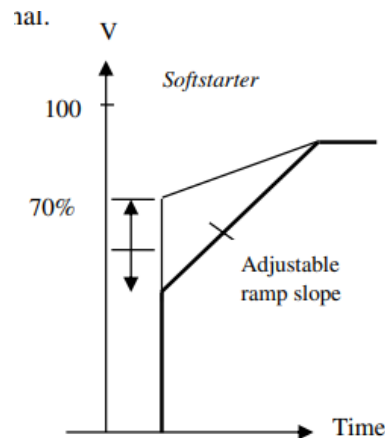
2.6. *Soft Starter*

Soft starter adalah metode untuk mengatur *arus start* motor listrik . Prinsip operasionalnya adalah menyesuaikan tegangan yang masuk ke motor. Pertama-tama motor hanya menerima tegangan yang rendah, sehingga arus dan torsi juga rendah. Dalam kondisi ini motor bergerak lambat dan tidak menghasilkan lonjakan. Selanjutnya tegangan dinaikkan secara bertahap hingga tegangan nominal tercapai dan motor berputar pada kecepatan nominal. Komponen utama *soft starter* adalah thyristor dan sirkuit yang mengontrol *firing* thyristor . Seperti yang diketahui, *output* dari thyristor dapat diatur melalui pin gerbang. Rangkaian ini mengontrol *level* tegangan yang dikeluarkan oleh thyristor. Di antara metode lainnya, metode *soft start* memiliki *slip* terendah dan torsi terendah pada kondisi tanpa beban dan beban [24].



Gambar 2.8 Rangkaian dasar *soft starter* [25].

Dengan memvariasikan sudut tegangan pemicu (α), V_0 dapat divariasikan dari 0 V hingga V_s . Dengan sirkuit kontrol yang tepat, kontrol arus motor atau waktu akselerasi dapat dicapai dengan menerapkan pulsa gerbang menuju triac pada waktu yang berbeda dalam setiap setengah siklus tegangan sumber. Untuk mendapatkan nilai tegangan langkah dari nol hingga tegangan penuh, penembakan triac harus dimulai dari sudut 180° hingga 0° [26].



Gambar 2.9 Time Voltage Ramp [24].

Tegangan *starting* pada metode *soft starter* tidak bergantung pada konsumsi arus dan kecepatan motor tetapi diprogram untuk mengikuti kontur *Time Voltage Ramp* (TVR). Karena TVR, motor pada awalnya hanya menerima tegangan rendah, yaitu antara 10% dan 70% dari tegangan nominalnya, sehingga arus dan torsi juga rendah. Pada tingkat ini, motor bergerak lambat dan tidak menghasilkan daya. Tegangan kemudian secara bertahap meningkat hingga tegangan nominal tercapai dan motor berputar pada kecepatan nominal [24].

Thyristor bekerja dengan menyesuaikan sudut penyalan sesuai kebutuhan sehingga tegangan *output* dapat bervariasi. *Firing angle* adalah waktu yang berlalu sebelum tegangan *input* menjadi *positif* dan thyristor menyala. Saat mengatur *firing angle* thyristor untuk sumber AC, tegangan saluran yang terdeteksi oleh *zero-crossing detector* digunakan sebagai referensi, karena teknik *firing* dari thyristor untuk sumber AC adalah *line switching* atau juga disebut teknik *firing* alami, yaitu thyristor dimatikan saat berada dalam keadaan *reverse bias*, dan *outputnya* bergantung pada tegangan sumber dari mode *firing zero-crossing*. Dalam mode penyalan *zero-crossing*, waktu penyalan thyristor dapat disesuaikan [27].

Metode yang ada untuk menyesuaikan sudut penyalan thyristor adalah dengan menggunakan rangkaian *analog*. *Level* tegangan yang dihasilkan tergantung pada nilai resistor dan kapasitor. Rangkaian *analog* yang berbeda juga digunakan untuk setiap rangkaian penyearah terkendali dan rangkaian pengatur tegangan AC [28].

2.7. Kajian Pustaka

Pada pembahasan penelitian ini merujuk pada penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Adapun pembahasan penelitian ini terkait dengan analisis ketidakseimbangan arus *staring soft starter*. Berikut beberapa penjelasan penelitian sebelumnya yang mendukung pada penelitian ini.

1. Pada penelitian pertama berjudul “Analisis pengaruh arus tidak seimbang terhadap kerja motor induksi tiga fasa”. Penelitian ini mengevaluasi dampak arus tidak seimbang pada kinerja motor induksi tiga fasa, yang merupakan komponen penting dalam industri. Ketidakseimbangan arus, yang dapat terjadi akibat berbagai faktor seperti distribusi beban yang tidak merata, berpotensi mengganggu operasi motor dengan meningkatkan torsi, menurunkan daya, dan mengurangi efisiensi. Melalui serangkaian eksperimen laboratorium, penelitian ini menemukan bahwa arus yang semakin tidak seimbang menyebabkan peningkatan torsi pada motor, namun berakibat pada penurunan daya *output* dan efisiensi motor secara keseluruhan. Penurunan efisiensi ini terjadi karena daya yang dihasilkan tidak sebanding dengan daya input, yang disebabkan oleh arus yang tidak seimbang. Kesimpulannya, ketidakseimbangan arus berdampak signifikan dan negatif terhadap kinerja motor induksi tiga fasa [29].
2. Pada penelitian kedua ini berjudul “Desain sistem kontrol sudut penyalan thyristor komutasi jaringan berbasis mikrokontroler PIC 16F877” yang ditulis oleh Tarmiz. Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa sistem kontrol yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler PIC 16F877 efektif dalam mengatur sudut penyalan thyristor pada berbagai rangkaian, memberikan hasil yang presisi dan dapat diandalkan. Pada rangkaian penyearah gelombang penuh satu fasa, sudut penyalan dapat diatur dari 0° hingga 180° , memungkinkan kontrol tegangan yang fleksibel sesuai kebutuhan. Sementara itu, pada rangkaian penyearah tiga fasa, sudut penyalan dapat diatur dari 0° hingga 60° , yang juga memungkinkan penyesuaian tegangan keluaran secara akurat. Hasil eksperimen menunjukkan konsistensi yang tinggi dengan simulasi, membuktikan bahwa sistem ini mampu mengontrol penyalan thyristor dengan tepat dan efisien.

Temuan ini menegaskan potensi besar mikrokontroler PIC 16F877 dalam aplikasi kontrol industri, khususnya dalam mengoptimalkan kinerja thyristor untuk berbagai keperluan [27].

3. Pada penelitian ketiga kali ini berjudul “Analisis efektifitas penggunaan metode *soft starter* saat *start* awal pada pengoperasian motor 220 kW”. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas penggunaan metode *soft starter* dalam mengurangi lonjakan arus saat *start* awal motor listrik pada sistem pendingin sekunder reaktor serba guna G.A Siwabessy. Sistem pendingin sekunder ini terdiri dari beberapa motor pompa yang sebelumnya menggunakan metode Star-Delta untuk *start* awal. Namun, metode ini menyebabkan lonjakan arus yang signifikan, yang tidak hanya mengurangi masa pakai motor tetapi juga meningkatkan risiko kerusakan komponen listrik akibat arus yang tinggi. Dalam penelitian ini, dilakukan modifikasi dengan menerapkan metode *Soft Starter* pada dua motor, yaitu PA-02 AP001 dan PA-03 AP001, untuk membandingkan efektivitasnya dengan metode Star-Delta. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *Soft Starter* secara signifikan berhasil menurunkan lonjakan arus *start*. Saat menggunakan metode Star-Delta, lonjakan arus mencapai 765 A, sementara dengan metode *Soft Starter*, lonjakan arus berkurang menjadi 517 A. Ini menunjukkan penurunan lonjakan arus sebesar 0,67%. Penurunan ini menunjukkan bahwa metode *Soft Starter* lebih efektif dalam mengendalikan lonjakan arus saat *start* awal motor, yang pada gilirannya dapat memperpanjang masa pakai motor dan mengurangi risiko kerusakan. Penelitian ini memberikan bukti bahwa implementasi metode *Soft Starter* pada sistem pendingin sekunder sangat bermanfaat, terutama dalam aplikasi industri yang memerlukan keandalan tinggi dari sistem kelistrikan mereka [30].
4. Penelitian keempat memiliki judul “Studi pengaruh pemasangan *soft starter* motor induksi tiga *phase* pada tisu *machine* di PT. Pindo Deli Perawang”. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh pemasangan *soft starter* pada motor induksi tiga fasa di PT. Pindo Deli Perawang, khususnya pada tisu *machine* unit 4. Motor induksi yang dihidupkan tanpa metode pengasutan seperti

Direct On line (DOL) atau *soft starter* cenderung menarik arus yang sangat tinggi (*inrush current*) dan menghasilkan torsi yang besar, yang dapat menyebabkan penurunan tegangan pada saluran dan kerusakan pada peralatan. Dalam penelitian ini, perbandingan dilakukan antara metode DOL dan *Soft Starter* untuk menilai perbedaan karakteristik arus dan torsi yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *Soft Starter* secara signifikan mengurangi arus *inrush* dan torsi start motor. Pada metode DOL, arus *inrush* mencapai 4.266 A, sedangkan dengan *Soft Starter*, arus ini turun menjadi 2.238 A. Selain itu, torsi elektromagnetik dan mekanik yang dihasilkan juga lebih rendah ketika menggunakan *Soft Starter*, dengan nilai masing-masing sebesar 2.023 Nm dan 887 Nm dibandingkan dengan metode DOL yang menghasilkan torsi sebesar 8.095 Nm dan 4.851. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *Soft Starter* lebih efektif dalam mengurangi lonjakan arus dan torsi yang dapat merusak motor dan peralatan terkait, serta memperpanjang masa pakai motor induksi di industri [31].

5. Pada penelitian kelima ini memiliki judul “Analisa *starting* motor induksi 3 fasa dengan menggunakan program di PT Madubaru Yogyakarta”. Penelitian ini menganalisis metode *starting* motor induksi 3 fasa di PT Madubaru Yogyakarta menggunakan simulasi ETAP dan PSIM menunjukkan perbedaan kinerja yang signifikan antara metode yang digunakan. Metode *Direct-On-Line (DOL)* menghasilkan lonjakan arus *starting* yang sangat besar, mencapai 580% dari arus nominal motor (777 A). Lonjakan ini berpotensi menyebabkan penurunan tegangan sesaat yang dapat merusak motor dan mengganggu peralatan lain dalam sistem. Metode Star-Delta berhasil mengurangi lonjakan arus menjadi 200% dari arus nominal (268 A) pada saat koneksi Star. Namun, metode yang paling efektif adalah *soft starter* elektronik, yang secara signifikan menekan arus *starting* hingga hanya 8 A dengan mengontrol sudut pemicuan thyristor secara bertahap. Metode *soft starter* ini tidak hanya mengurangi arus *starting*, tetapi juga memberikan transisi tegangan yang lebih halus, sehingga mengurangi stres mekanis pada motor. Hasil ini menunjukkan bahwa

penggunaan *soft starter* elektronik adalah pilihan yang lebih efisien dan aman untuk memulai motor induksi, terutama dalam aplikasi industri di mana kestabilan tegangan dan keandalan sistem sangat penting [32].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Pada penelitian ini memiliki alur penelitian yang dimana dimaksudkan untuk mendapatkan tujuan awal pada penelitian tentang ketidakseimbangan arus *starting* pada *soft starter*. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data secara langsung serta literatur dengan cara melakukan pencarian sumber referensi terhadap penelitian yang dilakukan seperti buku artikel, jurnal baik nasional maupun internasional yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Adapun metode penelitian yang pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan salah satu metode dengan cara melakukan pencarian sumber referensi terhadap penelitian yang dilakukan seperti buku artikel, jurnal baik nasional maupun internasional yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Hal tersebut dapat berfungsi sebagai landasan teori yang digunakan pada penelitian. Adapun bidang yang dicari pada studi literatur penelitian ini seperti teori tentang motor induksi, *starting* pada motor induksi, *soft starter*, serta efisiensi terhadap motor induksi.

2. Observasi atau pengamatan langsung

Peneliti mengamati apa yang dikerjakan oleh teknisi, mendengarkan apa yang diucapkan, dan berpartisipasi dalam beberapa kegiatan saja, hal itu dilakukan agar pengumpulan data dapat disesuaikan dengan objek sasaran. Contoh bentuk observasi yang dilakukan yaitu dengan mengetahui proses motor induksi yang digunakan, sistem kontrol *starting* pada motor induksi.

3. Pengumpulan data

Pengumpulan data yang dilakukan yaitu dengan cara melakukan pengukuran pada motor induksi yang menggunakan metode *starting Soft Starter*. Adapun data yang dibutuhkan berupa spesifikasi motor yang digunakan, arus pada saat *starting* serta dalam kondisi normal, tegangan, kecepatan motor, serta daya.

4. Dokumentasi

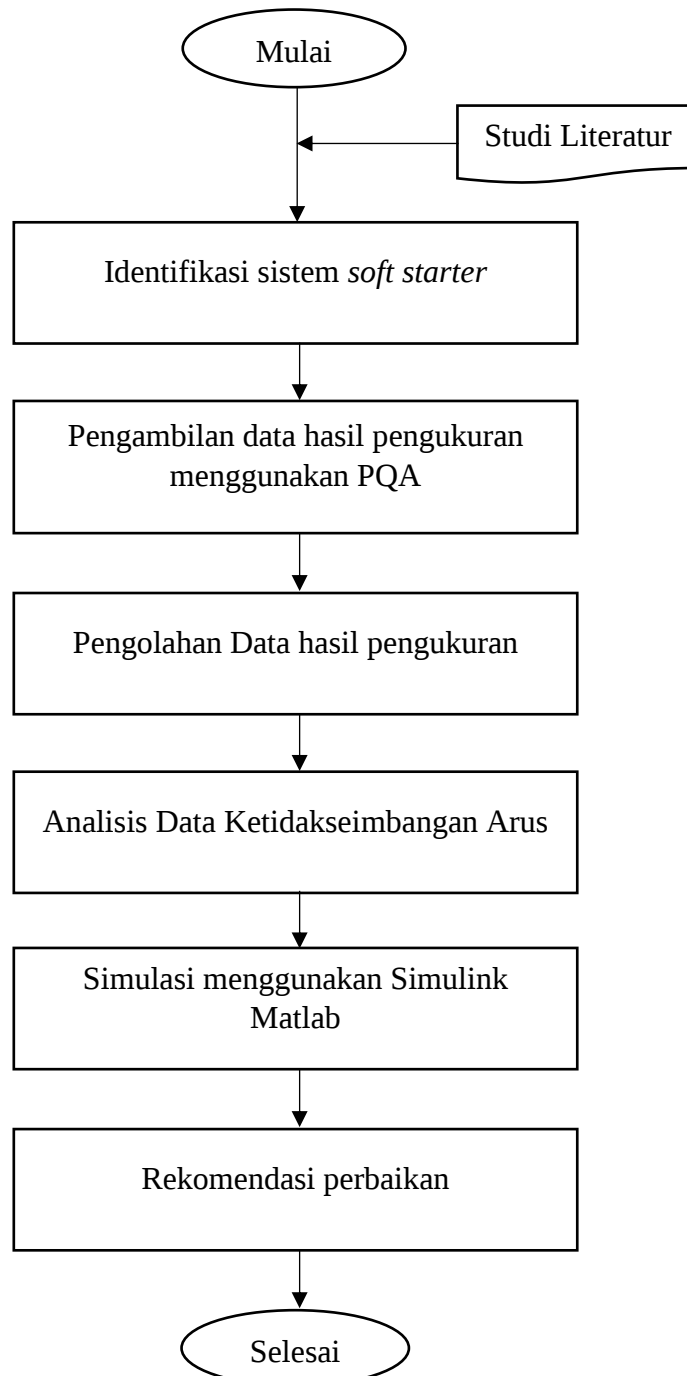
Dokumentasi pada penelitian ini yaitu dengan melakukan pengumpulan data dengan cara mencatat data yang berhubungan dengan masalah yang akan diteliti baik dari hasil pengukuran ataupun dokumen-dokumen yang dimiliki perusahaan. Salah satu contoh dokumentasi pada penelitian ini yaitu pada saat pengambilan data spesifikasi motor ataupun pada saat pengukuran dilakukan.

5. Analisis Data

Setelah data-data yang dibutuhkan telah didapatkan, maka untuk menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini dilakukanlah analisa terhadap data tersebut yaitu berupa arus, tegangan, kecepatan motor serta daya. Analisa data dilakukan dengan cara melakukan kembali perhitungan secara manual baik dari metode *Soft Starter* sebagai langkah perbandingan terhadap data pengukuran. Analisa pada penelitian ini diharapkan mampu mengetahui metode *starting* yang lebih efisien.

3.2. Diagram Alir Penelitian

Dalam proses analisis ketidakseimbangan arus *starting soft starter* di PT Krakatau Tirta Industri dilakukan dengan beberapa tahapan. Proses tahapan dilakukan agar *variable* yang dibutuhkan dapat terpenuhi untuk dapat dilakukan analisis. Adapun Diagram alir pada penelitian kali ini dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir penelitian.

3.3. Komponen Penelitian

Dalam penelitian ini diperlukan beberapa alat ataupun bahan agar penelitian dapat tercapai. Berikut komponen yang dibutuhkan pada penelitian seperti:

1. Perangkat keras atau laptop.
2. Motor 71M1 GE Industries XSD Ultra.

Motor yang digunakan PT. Krakatau Tirta Industri yaitu motor pabrikasi dari *Wolong Company* asal Mexico yang mana penggunaannya untuk pompa air yang mempunyai posisi *vertical* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor 71M1.

Parameter	Spesifikasi
Pabrikasi	GE Industries
Type	5KS449SAJ6048
Tegangan Nominal (V)	380 V
Arus Nominal (A)	336 A
Frekuensi (Hz)	50 Hz
Daya (kW / HP)	186 kW / 250 HP
Kecepatan (RPM)	1490 RPM
Faktor Daya (Cos ϕ)	0.88
Code letter	H
Metode <i>Starting</i>	<i>Soft Starter</i>
InductionMotor.Rs	0,02
InductionMotor.Ls	0,00011
InductionMotor.Rr	0,06
InductionMotor.Lr	0,00014

Pada tabel 3.1 dapat dilihat bahwa motor induksi yang digunakan sangatlah besar yaitu bekapasitas 186 kW, hal tersebut karena penggunaan motor yang digunakan sebagai pompa air distribusi. Penggunaan motor induksi 71M1 sudah sangat lama digunakan di PT Krakatau Tirta Industri, yaitu sejak tahun 1979 pada saat perusahaan pengolahan air di wilayah cilegon ini didirikan.

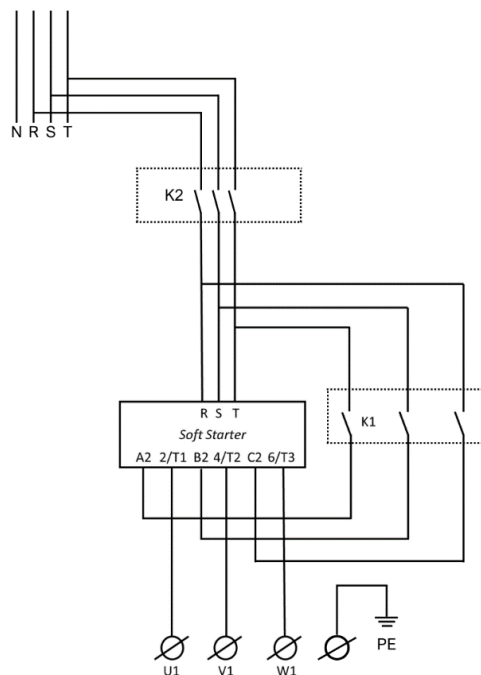
3. Perangkat *Soft Starter*

Pada penelitian ini difokuskan terhadap metode *starting soft starter*, dimana pada motor 71M1 milik PT. Krakatau Tirta Industri menggunakan tipe *schneider altistar48* dengan kode seri ATSC41Y. Berikut adalah spesifikasi pada *soft starter altistar48*.

Tabel 3.2 Spesifikasi *Soft Starter* Motor 71M1.

Parameter	Spesifikasi
Model	Schneider ATS48C41Y
Tegangan Operasi	208V hingga 690V AC
Frekuensi Operasi	50 Hz / 60 Hz
Daya Motor Maksimum	110 kW hingga 900 kW / 1250 HP
Arus Nominal	17A hingga 1200A (tergantung pada model spesifik)
Tipe Motor	Motor induksi 3 fasa
Suhu Operasi	-10°C hingga +60°C

Pada tabel 3.2 dapat dilihat bahwa *soft starter* yang digunakan juga sangatlah besar, hal itu dikarenakan untuk mengimbangi besarnya kapasitas motor yang digunakan. *Soft starter* ATS48 ini mampu bekerja pada motor berkapasitas 110 kW sampai 900 kW dengan tampilan ataupun pengaturan yang sudah digital. Adapun rangkaian yang digunakan pada *soft starter* motor 71M1 sebagai berikut.

Gambar 3.2 Rangkaian *Soft Starter* Motor 71M1.

Pada gambar 3.2 dapat dilihat bahwa *soft starter* memiliki 3 inputan fasa dengan jumlah kontaktor 2, dimana kontaktor K1 sebagai bypass kontaktor dan K2 sebagai incoming kontaktor.

4. Alat Pengukuran

Alat yang digunakan pada saat pengukuran berupa *Power Quality Analyzer* 438-II dari *fluke* yang mana pada alat tersebut kita cukup menggunakan mode *motor analyzer* sehingga parameter-parameter pengukuran seperti arus *starting* dan tegangan serta mekanikal dari motor itu sendiri sudah dapat terukur.



Gambar 3.3 Power quality analyzer fluke 438-II [18].

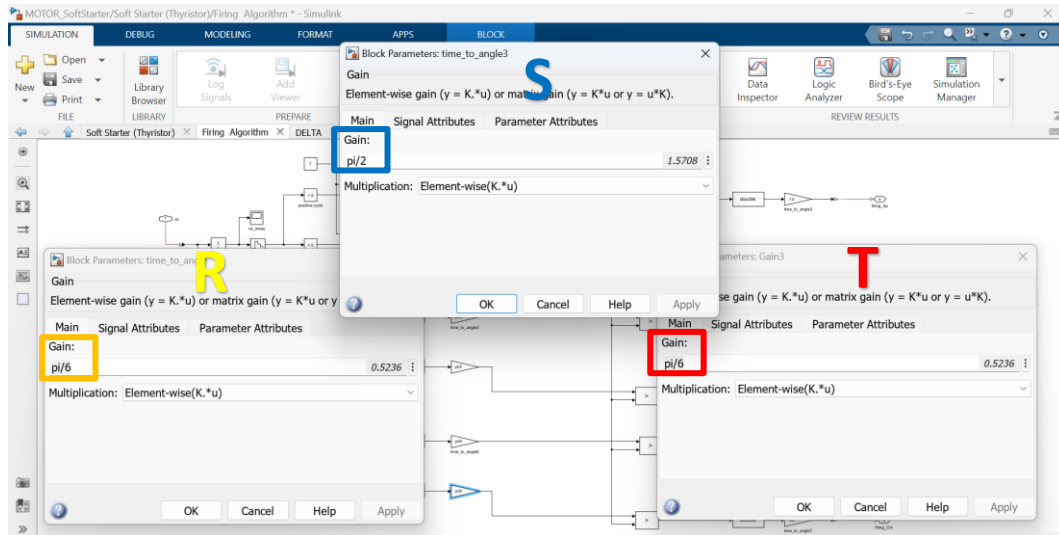
Pada gambar 3.3 merupakan alat ukur yang digunakan pada penelitian kali ini yang bernama *Power Quality Analyzer*, alat ini mampu mengukur parameter pada motor induksi. Dengan menggunakan mode *motor analyzer* alat ini mampu mengukur tegangan, arus, frekuensi, serta parameter mekanikal lainnya.

SETUP FUNC. PREF.	
MOTOR SETUP	
From motor nameplate	
Rated Power:	186.4kW
	250.0 hp
Rated Speed:	1490 rpm
Rated Voltage:	380 V
Rated Current:	336.0 A
Rated Frequency:	50 Hz
Rated Cos ϕ :	0.88
Rated Service Factor:	1.15
Motor Design Type:	NEMA-B
Variable Speed Drive:	YES
UNIT SETUP	TREND SETUP
	DEFAULTS
	START

Gambar 3.4 Parameter setting PQA.

Dari gambar 3.4 telah disesuaikan dengan spesifikasi motor induksi pada *nameplate*. Dengan memasukan parameter yang sesuai dengan spesifikasi motor yang digunakan, alat ini mampu membaca dengan *sensitif variabel* pengukuran.

Penulis mencoba melakukan simulasi dengan merubah sudut penyalan pada masing-masing fasa menggunakan simulink matlab dengan parameter sudut penyalan thyristor sebagai berikut.



Gambar 3.5 Pengaturan firing angle.

Pada gambar 3.5 *firing angle* diatur dengan mengonversi radian ke derajat. Fasa S menggunakan 90° ($\frac{\pi}{2} = 1,5708$ rad), memastikan torsi optimal dan mengurangi lonjakan arus. Fasa R dan T diatur pada 30° ($\frac{\pi}{6} = 0,5236$ rad) untuk menjaga keseimbangan arus dan stabilitas sistem.

3.4. Lokasi dan Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian tugas akhir dilaksanakan di PT Krakatau Tirta Industri, kegiatan berlangsung selama 2 bulan penuh dimulai pada tanggal 1 April sampai 31 Mei 2024.

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

Pada bab 4 ini menjelaskan hasil pengukuran arus *starting* yang sudah dilakukan pada motor induksi 3 fasa di PT Krakatau Tirta Industri. Selain itu dilakukan perhitungan dan simulasi menggunakan Simulink matlab sebagai pembandingan dari hasil pengukuran yang telah berlangsung.

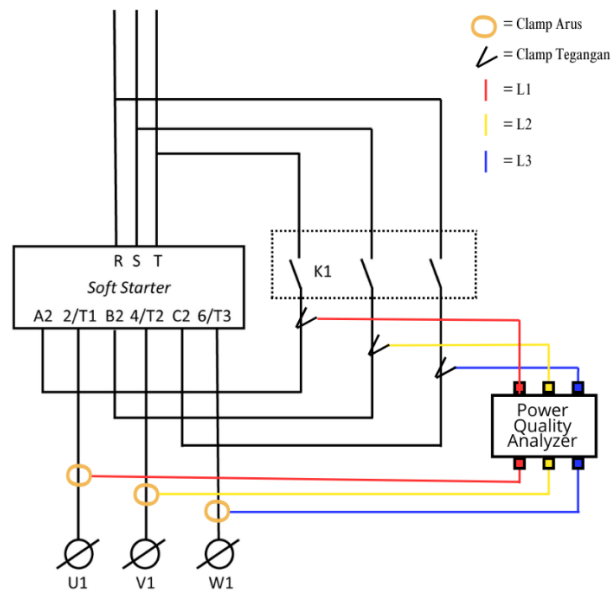
4.1. Hasil Pengukuran

Pada penelitian ini muncul dari ditemukannya ketidakseimbangan arus *starting* pada saat pengukuran motor berlangsung, oleh karena itu sebagai tindak lanjut hal tersebut dilakukanlah kajian atau penelitian ini untuk mengetahui hal-hal ataupun penyebab dari terjadinya ketidakseimbangan arus *starting* tersebut dengan harapan dapat menjadi salah satu upaya untuk dilakukannya pemeliharaan terhadap motor. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi motor induksi tiga fasa yang digunakan operasional pompa air di PT. Krakatau Tirta Industri menggunakan daya 186 kW, dan arus nominal sebesar 336 A dan tegangan nominal sebesar 380 V. Dengan motor yang memiliki daya yang cukup besar ini, diharapkan lonjakan arus pada saat *starting* tidak dapat mengganggu operasional seperti adanya jatuh tegangan atau bahkan menyebabkan komponen-komponen listrik sekitar menjadi rusak.

Oleh karena itu pemilihan metode *starting* sangatlah penting guna menanggulangi hal tersebut sehingga pada motor 71M1 ini menggunakan metode *starting soft starter* yang berfungsi mereduksi arus *start* dengan cara mengatur tegangan masuk pada saat motor dinyalakan. Pada penelitian ini pengukuran arus *starting* dilakukan menggunakan alat bernama *Power Quality Analyzer* dari fluke. Dimana pada saat pengukuran berlangsung *Power Quality Analyzer* diatur pada mode motor *analyzer* yang dimaksudkan untuk pengukuran pada motor, dimana parameter yang terukur berupa tegangan, arus, frekuensi, dan kecepatan motor. Adapun pengaturan pada *Power Quality Analyzer* seperti berikut.

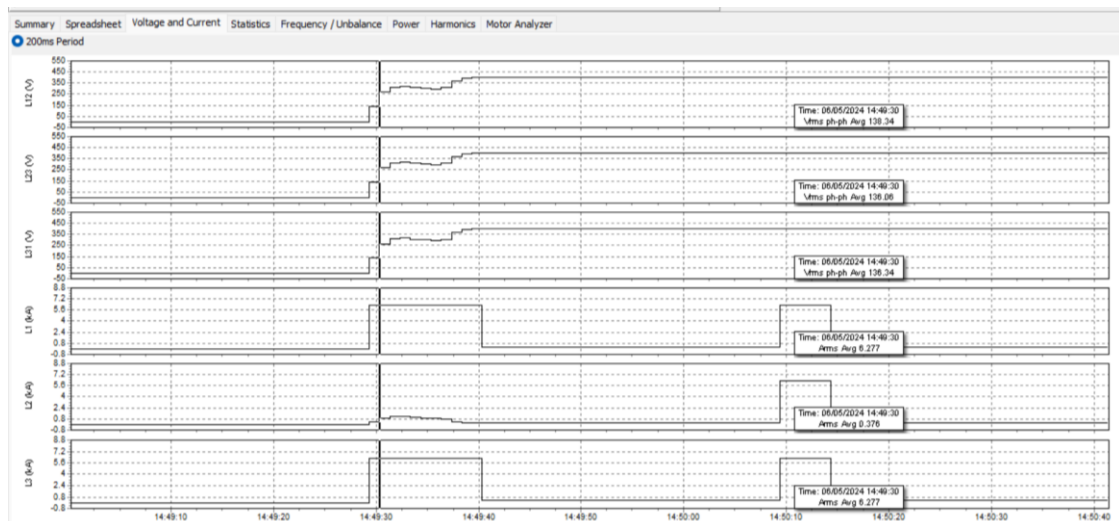
Selain itu pengambilan data pengukuran dilakukan dengan memperhatikan alat ukur tersambung dengan benar sesuai dengan panduan penggunaan alat

tersebut yaitu dengan memperhatikan arah *clamp* tersebut. Kemudian Teknik ataupun cara pengambilan data tertampil pada gambar berikut.



Gambar 4.1 Cara pengambilan data.

Teknik pengambilan data pada *power quality analyzer* dilakukan dengan menggunakan komponen tambahan yaitu *clamp* arus dan juga tegangan. Dapat dilihat pada gambar 4.2 *clamp* tegangan dipasang pada *output* kontaktor K1 sedangkan *clamp* arus dipasang pada *output soft starter* pada masing-masing fasa sesuai dengan petunjuk penggunaan pada buku manual *power quality analyzer fluke*. Sehingga dari teknik pengambilan tersebut didapatkan data arus *starting* seperti berikut ini.



Gambar 4.2 Grafik Tegangan dan Arus.

Pada gambar 4.3 hasil pengukuran memperlihatkan bahwa lonjakan arus sangatlah tinggi yaitu sekitar 6,277 A, selain terdapat perbedaan dalam bentuk grafik atau pola kenaikan arus saat proses *starting* terjadi. Pada fasa R dan T, terlihat bahwa gelombang arus menunjukkan karakteristik yang relatif stabil dan konstan, dimana peningkatan arus berlangsung tanpa perubahan yang signifikan dalam bentuk gelombangnya. Ini mengindikasikan bahwa arus pada kedua fasa tersebut mengalami kenaikan yang sama dan konsisten sepanjang waktu dengan nilai arus sebesar 6,277 A.

Sedangkan keadaan yang berbeda terlihat pada fasa S, dimana pada fasa ini kenaikan arus tidak mengikuti pola yang sama dengan fasa R dan T. Sebaliknya, arus pada fasa S meningkat secara bertahap, dengan perubahan yang lebih lambat dan bertingkat dalam nilai arusnya. Gelombang arus pada fasa S menunjukkan bahwa proses kenaikan arus tidak berlangsung secara *instan* atau konstan, tetapi lebih perlahan dan bervariasi, menghasilkan nilai arus yang berbeda dibandingkan dengan kedua fasa lainnya dengan nilai arus tertinggi sebesar 1,152 A.

Perbedaan dalam bentuk gelombang dan pola kenaikan arus ini mungkin menunjukkan adanya variasi dalam karakteristik beban yang terhubung pada fasa-fasa tersebut atau bisa juga disebabkan oleh perbedaan dalam kondisi sirkuit atau komponen yang terlibat dalam proses *starting*. Ini adalah indikasi penting yang memerlukan perhatian lebih lanjut untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi distribusi arus pada masing-masing fasa, yang pada akhirnya dapat berdampak pada kinerja keseluruhan sistem. Adapun nilai arus *starting* pada masing-masing fasa tersebut seperti pada tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Data Kenaikan Arus *Starting* Motor 71M1 Terhadap Waktu.

Time	Tegangan (V)			Arus (A)		
	R	S	T	R	S	T
14:49:29	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14:49:30	138,3	136,0	136,3	6,277	0,376	6,277
14:49:31	270,4	267,5	266,2	6,277	0,923	6,277
14:49:32	313,7	311,4	309,2	6,277	1,152	6,277
14:49:33	321	319,1	316,6	6,277	1,137	6,277
14:49:34	309,7	307,6	305,4	6,277	1,022	6,277
14:49:35	304,1	302,2	300,1	6,277	0,952	6,277
14:49:36	298,3	296,5	294,6	6,277	0,853	6,277

Time	Tegangan (V)			Arus (A)		
	R	S	T	R	S	T
14:49:37	310,2	308,9	307,3	6,277	0,752	6,277
14:49:38	367,8	367,8	366,4	6,277	0,341	6,277
14:49:39	392,8	393,6	392,2	6,277	0,315	6,277
14:49:40	400,8	402	400,6	6,277	0,304	6,277
14:49:41	400,8	401,9	400,6	0,294	0,304	0,304
14:49:42	400,8	401,9	400,6	0,294	0,304	0,304

Berdasarkan data yang terdapat pada Tabel 4.1 di atas, dapat diamati bahwa total durasi proses *starting* berlangsung selama 10 detik sejak motor mulai diaktifkan. Dalam periode ini, terjadi beberapa proses penting yang berkaitan dengan perilaku arus *starting* pada masing-masing fasa motor. Pada fasa R dan T nilai arus *starting* yang tercatat cenderung sama yaitu sebesar 6,277 A. Kesamaan ini menandakan adanya kestabilan dalam peningkatan arus pada kedua fasa tersebut selama proses *starting* berlangsung.

Stabilitas arus ini penting karena mencerminkan kinerja yang optimal dalam pembagian beban pada motor, sehingga menghindari adanya ketidakseimbangan yang bisa berakibat negatif, seperti panas berlebih atau kerusakan komponen. Dengan nilai arus yang konsisten pada fasa R dan T, dapat dipastikan bahwa motor bekerja dengan efisiensi yang baik selama tahap awal penyalaan, menghindari lonjakan arus yang berlebihan yang dapat menyebabkan gangguan operasional atau kerusakan pada sistem kelistrikan.

Selain itu, kestabilan arus *starting* pada kedua fasa ini menunjukkan desain sistem kelistrikan yang baik, dimana arus yang masuk pada saat *starting* terdistribusi secara merata. Distribusi arus yang merata tersebut membantu mengurangi kemungkinan terjadinya lonjakan arus yang tidak diinginkan. Lonjakan tersebut bisa menyebabkan pemborosan energi dan bahkan merusak komponen motor jika terjadi secara terus-menerus. Oleh karena itu, pengamatan terhadap arus *starting* ini sangat penting dalam memastikan keandalan dan performa motor secara keseluruhan, khususnya dalam fase-fase awal pengoperasian yang sering kali menjadi titik kritis bagi motor listrik.

Sedangkan pada fasa S menunjukkan pola yang berbeda dibandingkan dengan fasa R dan T. Jika pada kedua fasa sebelumnya nilai arus *starting* terlihat stabil dan konsisten, maka pada fasa S terlihat arusnya justru tidak menunjukkan kestabilan yang sama. Nilai arus *starting* pada fasa S tampak bervariasi sepanjang durasi *starting*, tidak mengikuti pola yang seragam seperti yang terlihat pada fasa lainnya. Arus tertinggi pada fasa S tercatat terjadi pada detik ketiga, di mana nilai arus mencapai puncak sebesar 1,152 A. Setelah mencapai puncaknya, arus pada fasa S mulai menunjukkan *tren* penurunan yang bertahap, perlahan-lahan menurun seiring berjalannya waktu. Penurunan ini terus berlangsung hingga akhirnya arus pada ketiga fasa termasuk fasa S, mulai kembali stabil dan seragam pada tahap akhir proses *starting*.

Hal ini bisa diindikasikan adanya fluktuasi beban atau variasi dalam kondisi motor yang mungkin mempengaruhi distribusi arus pada fasa S. Ketidakseimbangan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti perubahan mendadak dalam tegangan yang sering disebut tegangan jatuh atau adanya hambatan yang lebih tinggi di sepanjang jalur fasa S. Namun setelah fase awal yang bervariasi tersebut arus pada fasa S berhasil menyesuaikan dan mencapai stabilitas, yang berarti motor mampu mengatasi fluktuasi awal dan beroperasi dengan efisien setelahnya. Hal ini juga ditunjukkan dengan melakukan pemantauan arus pada setiap fasa, karena hal yang tidak konsisten atau lonjakan arus yang terlalu tinggi bisa menandakan potensi masalah yang perlu diperhatikan. Secara keseluruhan, pola yang berbeda pada fasa S memberikan dampak lebih lanjut mengenai karakteristik operasional motor selama proses *starting*, yang dapat menjadi acuan penting dalam melakukan penyesuaian atau perbaikan sistem untuk meningkatkan kestabilan dan efisiensi operasional motor di masa mendatang.

Perbedaan pola arus *starting* yang terjadi antara fasa R, T, dan S ini menjadi dasar bagi penulis untuk melakukan kajian lebih mendalam. Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengidentifikasi dan memahami penyebab yang mungkin menyebabkan variasi tersebut. Dengan mengetahui faktor-faktor yang berkontribusi terhadap perbedaan arus *starting* ini, diharapkan dapat diambil langkah-langkah preventif atau tindakan pemeliharaan yang lebih tepat terhadap motor induksi tiga fasa yang digunakan. Langkah-langkah ini penting untuk

memastikan bahwa motor dapat beroperasi dengan efisien dan meminimalkan risiko gangguan atau kerusakan yang mungkin terjadi di masa mendatang.

4.2. Hasil Perhitungan

Berdasarkan hasil pengukuran bahwa tegangan cenderung seimbang antar fasanya namun terkadang ketidakseimbangan tegangan pada sistem juga dapat mempengaruhi ketidakseimbangan arus motor induksi, oleh karena itu untuk membuktikan bahwa ketidakseimbangan hal tersebut dilakukan perhitungan sebagaimana merujuk pada persamaan 2.6 NEMA bahwa:

$$LVUR = \frac{\text{Besaran Deviasi Tegangan dari fasa} - \text{fasa}}{\text{Tegangan rata} - \text{rata fasa}} \times 100\%$$

Untuk mengetahui besar persentase ketidakseimbangan tegangan, dilakukan perhitungan sebagai berikut dengan referensi tegangan nominal pada nameplate motor 71M1.

Diketahui: R = 380 V, S = 420 V, dan T = 400 V

Maka:

- a. Menghitung tegangan rata-rata

$$V_{avg} = \frac{V_R + V_S + V_T}{3}$$

$$V_{avg} = \frac{380 + 420 + 400}{3} = \frac{1200}{3} = 400 \text{ V}$$

- b. Menghitung deviasi rata-rata dari setiap fasa

$$\Delta V_R = V_R - V_{avg} = 380 - 400 = 20 \text{ V}$$

$$\Delta V_S = V_S - V_{avg} = 420 - 400 = 20 \text{ V}$$

$$\Delta V_T = V_T - V_{avg} = 400 - 400 = 0 \text{ V}$$

- c. Menghitung deviasi maksimum

$$\Delta V_{Max} = \text{Max}(\Delta V_R \Delta V_S \Delta V_T) = \text{Max}(20, 20, 0) = 20 \text{ V}$$

- d. Menghitung ketidakseimbangan tegangan

$$LVUR = \frac{\text{Besaran Deviasi Tegangan dari fasa} - \text{fasa}}{\text{Tegangan rata} - \text{rata fasa}} \times 100\%$$

$$LVUR = \frac{20}{400} \times 100\% = 5\%$$

Penentuan arus *start* motor induksi untuk dapat dihitung berdasarkan data yang tertera pada *nameplate* motor dengan melihat *code letter* sehingga dapat dilakukan perhitungan sesuai dengan persamaan 2.7 dengan merujuk pada tabel standar dari NEMA yang tertera pada tabel 2.2. Untuk perhitungan arus didasari dari daya semu motor, menurut NEMA *code letter* H adalah 7,10 kVA/HP sehingga:

$$S_{start} = HP \times \text{code letter}$$

$$S_{start} = 250 \times 7.1$$

$$S_{start} = 1,775 \text{ kVA}$$

Dari hasil perhitungan daya semu kemudian kita dapat mencari arus *start* dengan persamaan 2.5 seperti berikut.

$$I_{start} = \frac{S_{start}}{3 \times V_{fasa}}$$

$$I_{start} = \frac{1,775 \text{ kVA}}{3 \times 380} = 1,557 \text{ A}$$

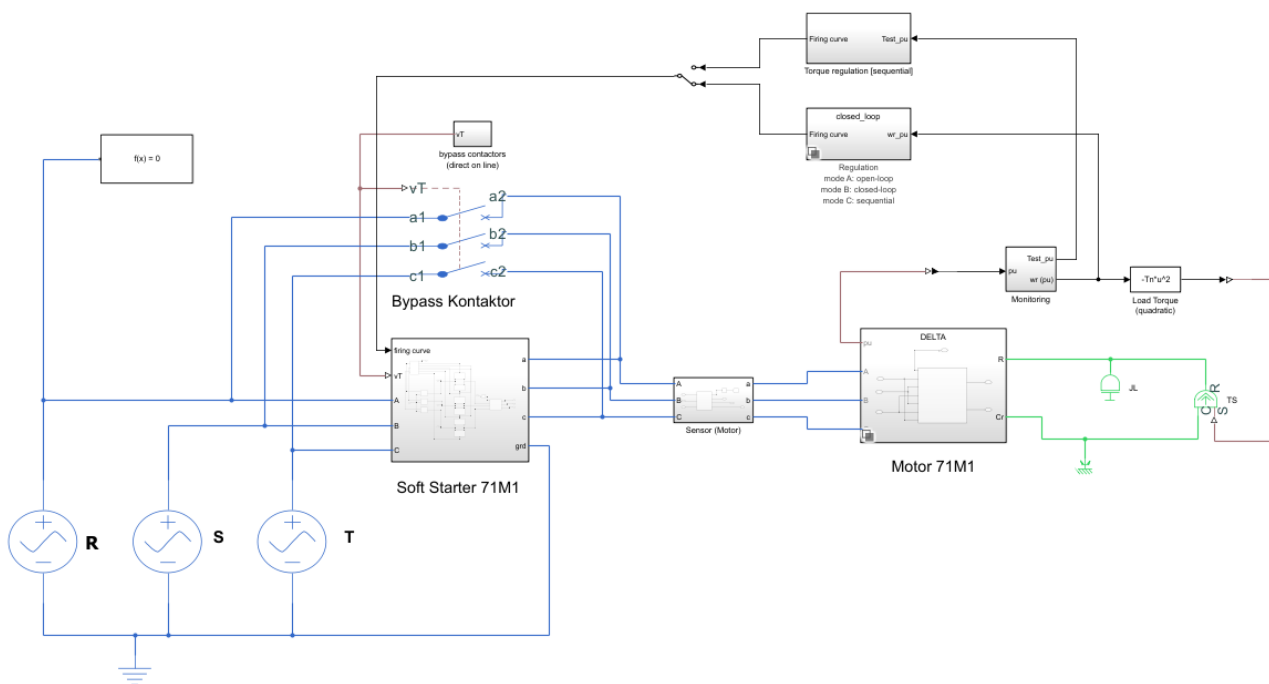
Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa arus *starting* motor 71M1 mencapai angka sebesar 1,557. Sementara itu, arus nominal yang dihasilkan oleh motor tersebut adalah sekitar 336 A. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai arus *starting* yang terukur ini adalah sekitar 5 kali lipat lebih besar daripada arus nominalnya. Perbandingan yang signifikan antara arus *starting* dan arus nominal ini menunjukkan karakteristik dari motor 71M1, dimana saat motor baru dinyalakan arus yang mengalir cenderung jauh lebih tinggi dibandingkan saat motor beroperasi secara normal. Hal ini terjadi karena pada saat motor pertama kali mulai berputar, dibutuhkan energi tambahan untuk mengatasi inersia awal dan memberikan torsi yang cukup untuk mencapai kecepatan operasi yang diinginkan.

Meskipun kondisi ini tergolong normal untuk motor induksi, perbedaan besar antara arus *starting* dan arus nominal juga dapat menjadi indikator penting yang perlu diperhatikan. Kenaikan arus yang sangat tinggi dalam waktu singkat dapat menyebabkan lonjakan beban listrik pada sistem dan, jika tidak diantisipasi dengan baik bisa menyebabkan lonjakan panas atau bahkan kerusakan pada komponen motor maupun rangkaian listrik yang terhubung. Oleh karena itu, sangat penting untuk memastikan bahwa sistem kelistrikan di sekitar motor mampu

menahan arus *starting* yang lebih tinggi tanpa mengalami gangguan. Selain itu, perbedaan antara arus *starting* dan arus nominal ini juga penting dalam pemilihan perangkat perlindungan, seperti circuit breaker dan relay, yang harus mampu mengatasi arus tinggi saat proses *starting* tanpa memutuskan arus secara tidak sengaja. Oleh karena itu, perhitungan seperti ini tidak hanya membantu dalam memahami performa motor tetapi juga dalam memastikan keamanan dan efisiensi dari seluruh sistem kelistrikan.

4.3. Hasil Simulasi Simulink Matlab

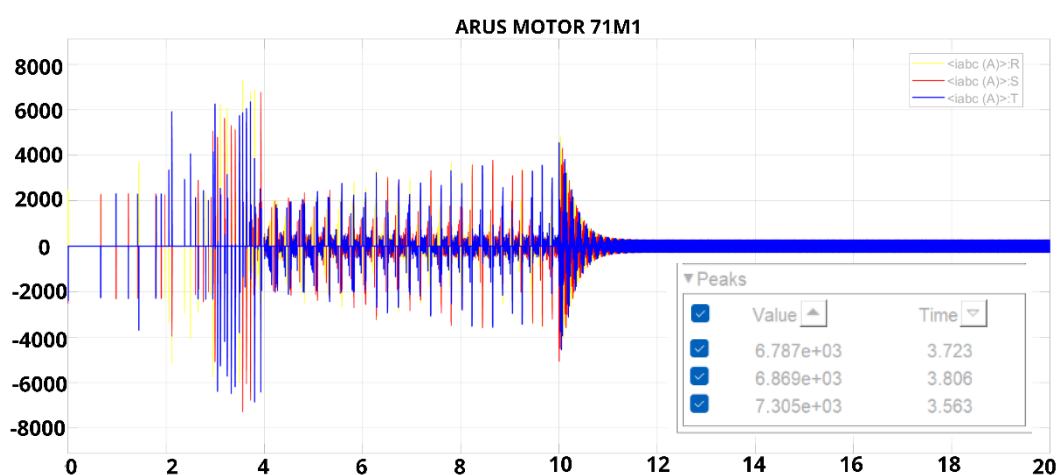
Salah satu cara yang telah dilakukan selain mengkaji lewat literatur maupun terjun langsung pada dunia industri, penulis mencoba melakukan identifikasi penyebab ketidakseimbangan arus *starting* dengan cara simulasi menggunakan SIMULINK MATLAB sebagai berikut:



Gambar 4.3 Rangkaian *Soft Starter* Simulink Matlab.

Rangkaian simulasi motor 71M1 dengan metode *soft starter* pada Simulink MATLAB terdapat komponen SCR thyristor anti-paralel pada masing-masing fasa. Fungsi dari SCR ini adalah untuk mengontrol tegangan motor selama proses *starting*, hal tersebut berfungsi agar *starting* motor lebih halus dan mengurangi lonjakan arus yang sering terjadi saat penyalaan awal. Dengan demikian, motor

dapat bekerja lebih efisien dan dengan masa pakai yang lebih lama. Pada Gambar 4.4 dapat dilihat beberapa komponen utama yang membentuk rangkaian simulasi. Komponen tersebut meliputi *supply* sebagai sumber tegangan *input*, *soft starter* yang berperan sebagai pengendali utama untuk mengatur arus dan tegangan selama proses *starting*, serta *bypass kontaktor* yang mengalihkan arus langsung ke motor setelah motor mencapai kecepatan stabil. Ketika motor sudah beroperasi secara normal, *bypass kontaktor* memastikan motor terhubung langsung ke sumber daya untuk efisiensi yang lebih baik. Semua parameter komponen dalam rangkaian telah diatur sesuai dengan spesifikasi yang digunakan di PT. Krakatau Tirta Industri, seperti yang tercantum pada Tabel 3.1. Pengaturan ini memungkinkan simulasi untuk merepresentasikan kondisi nyata, memberikan gambaran akurat tentang performa motor di lapangan dan membantu dalam pengujian berbagai kondisi operasional yang mungkin terjadi.



Gambar 4.4 Grafik Arus *Starting* 71M1.

Dengan mengatur parameter-parameter yang ada, hasil simulasi menunjukkan grafik arus pada Gambar 4.5. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa kenaikan arus *starting* mencapai nilai tertinggi sebesar 7,305 A. Setelah mencapai puncaknya, arus mulai menurun secara bertahap, yang berarti proses transisi dari kondisi awal *starting* ke tahap berikutnya. Penurunan ini menunjukkan bahwa motor sedang beradaptasi dan mengurangi beban awalnya setelah memberikan torsi yang cukup untuk mulai beroperasi. Jika diperhatikan lebih lanjut, terdapat kenaikan arus kembali pada detik ke-10, hingga akhirnya arus tersebut mencapai

nilai nominalnya. Fenomena ini terjadi karena adanya pengalihan sistem oleh *bypass* kontaktor. *Bypass* kontaktor bekerja dengan menghubungkan motor langsung ke sumber daya utama setelah motor mencapai kondisi stabil, sehingga arus yang mengalir ke motor menjadi lebih konstan. Proses ini memastikan motor beroperasi dengan efisiensi optimal, mengurangi fluktuasi arus, dan menjaga performa sistem kelistrikan secara keseluruhan.

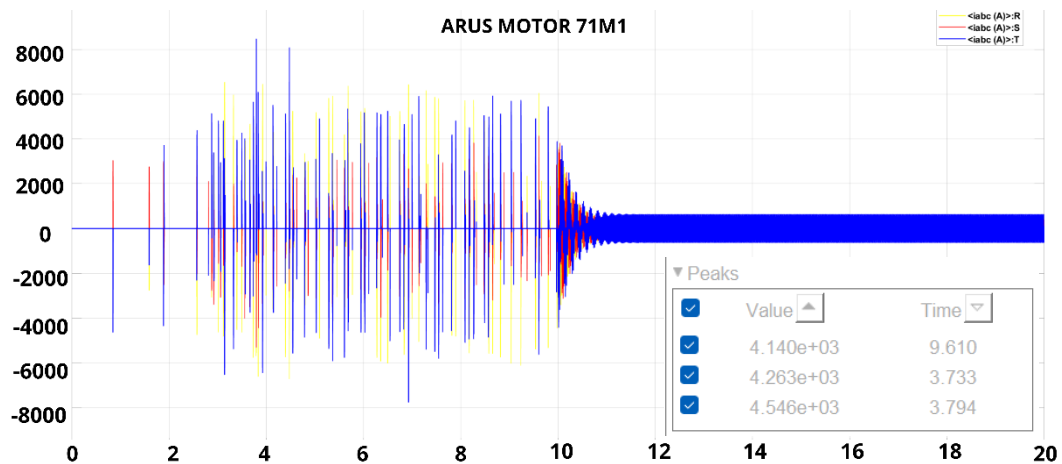
4.4. Analisa Hasil

Analisa hasil arus *starting* ini dilakukan dengan cara melakukan perbandingan dari metode-metode yang telah dilakukan dengan pengukuran, perhitungan dan simulasi. Dari pengukuran, perhitungan serta simulasi yang telah dilakukan pada Simulink matlab didapatkan nilai arus *starting* hasil yang berbeda dari masing-masing metode, dimana pada saat pengukuran arus terukur sebesar 6,277 A, kemudian pada saat perhitungan arus yang dihasilkan sebesar 1,557 A sedangkan hasil simulasi menunjukkan arus sebesar 7,305 A. Pada saat pengukuran berlangsung motor sedang digunakan untuk *mensupply* air kepada pelanggan sehingga arus terukur sangatlah besar karena motor sedang dalam kondisi berbeban. Akan tetapi pada perhitungan hasil yang didapatkan arus *starting* yang lebih kecil yaitu 8 kali lipat lebih tinggi dibandingkan arus nominalnya yang mana hal tersebut mendekati teori *Locked Rotor Current* (LRC). Sedangkan untuk mendapatkan hasil perbandingan yang signifikan dilakukanlah simulasi menggunakan Simulink matlab dengan tetap memperhatikan parameter-parameter komponen yang ada, akan tetapi hasil simulasi tidak luput dengan adanya *default library* yang tersedia pada aplikasi tersebut yang mana dari hal tersebut dapat mempengaruhi hasil.

4.4.1. Dampak Ketidakseimbangan Tegangan Terhadap Arus *Starting*

Salah satu faktor penyebab ketidakseimbangan arus tidak luput dari adanya ketidakseimbangan tegangan sumber. Menurut NEMA ketidakseimbangan tegangan operasi aman motor induksi berada 1-3%, apabila melebihi dari batas wajar yang dianjurkan oleh NEMA maka motor akan mengalami kerusakan ataupun dapat mempengaruhi usia pakai motor induksi. Oleh karena itu penulis mencoba mensimulasikan bentuk ketidakseimbangan tegangan sesuai dengan

perhitungan yang telah dilakukan sesuai dengan persamaan 2.6 yaitu 5% dengan nilai fasa R = 380 V, fasa S = 420 V dan fasa T = 400 V untuk membuktikan bahwa ketidakseimbangan tegangan dapat mempengaruhi ketidakseimbangan arus pada motor 71M1 dan berikut hasil simulasi pada SIMULINK MATLAB.



Gambar 4.5 Pengaruh ketidakseimbangan tegangan terhadap arus.

Dari tabel 4.6 dapat dilihat bahwa hasil ketidakseimbangan tegangan mempengaruhi arus motor induksi. Dimana hasil menunjukkan ketidakseimbangan dapat dilihat pada grafik bahwa fasa S (merah) cenderung lebih rendah dengan nilai tertinggi sebesar 4,546 A dibandingkan dengan fasa lainnya yaitu pada fasa R (kuning) menunjukkan *trent* tertinggi mencapai nilai lebih dari 6,000 A dan fasa T (biru) menunjukkan *trent* tertinggi mencapai nilai lebih dari 8,000 A.

Selain itu dari hasil perbandingan terlihat bahwa pada saat dilakukan metode perhitungan arus *starting* lebih kecil dibandingkan dengan pengukuran dan simulasi, hal tersebut terjadi karena perhitungan tersebut menggunakan parameter motor yang tidak terbebani selain itu impedansi pada motor juga perlu diperhatikan karena salah satu faktor yang mempengaruhi lonjakan arus dapat berupa impedansi dari motor maupun komponen yang terhubung pada motor itu sendiri. Oleh karena itu dilakukanlah simulasi yang harapannya dapat menggambarkan kondisi aslinya dengan memperhatikan parameter-parameter sistem yang ada.

Pada hasil pengukuran pada gambar 4.3 terlihat bahwa *trend* atau grafik pada fasa S berbeda dengan fasa R dan T, dimana pada fasa ini terlihat kenaikan arus secara bertahap dan terkonfirmasi kenaikan arus tersebut pada tabel 4.1. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan arus *starting* tidak seimbang diantaranya

ketidakseimbangan tegangan *input*, kegagalan *switching* thyristor, perbedaan sudut penyalan thyristor dan impedansi motor yang kurang baik.

Dari faktor-faktor tersebut, faktor ketidakseimbangan tegangan *input* bukanlah penyebab utama dari ketidakseimbangan arus, karena dapat dilihat pada tabel 4.1 dimana tegangan *input* cenderung seragam antar fasanya. Disisi lain kegagalan *switching* thyristor dapat mungkin terjadi, kegagalan *switching* yang dimaksud adalah salah satu thyristor pada rangkaian tidak bekerja secara maksimal dimana tegangan tidak diredam secara maksimal untuk mengatur tegangan yang diberikan ke motor selama fase start. Thyristor ini dihidupkan dan dimatikan dalam *interval* waktu tertentu atau pada titik-titik tertentu dalam gelombang sinusoidal AC untuk mengurangi tegangan yang diterapkan ke motor, yang pada gilirannya mengurangi arus *start*. Proses *switching* ini tidak menghasilkan gelombang sinusoidal penuh pada awal start, melainkan gelombang yang terpotong-potong. Ini yang menyebabkan arus yang terukur pada fase R dan T berbentuk pulsa, karena arus hanya mengalir saat thyristor dalam kondisi *on*.

4.4.2. Dampak *Firing Angle* Terhadap Arus *Starting*

Soft starter mengendalikan sudut penyalan (*firing angle*) dari thyristor, yang menentukan kapan thyristor diaktifkan dalam setiap siklus AC. Pada awal *start*, *firing angle* ini cukup besar sehingga hanya sebagian kecil dari gelombang AC yang diizinkan mengalir, menghasilkan arus yang tampak seperti pulsa. Seiring dengan motor yang mulai berakselerasi, *firing angle* ini secara bertahap dikurangi, memungkinkan lebih banyak bagian dari gelombang AC yang diterapkan ke motor, hingga akhirnya menghasilkan gelombang sinusoidal penuh saat motor mencapai kecepatan penuh dan *bypass contactor* mengambil alih.

Penulis melakukan simulasi dengan mengubah sudut penyalan pada masing-masing fasa motor menggunakan Simulink MATLAB, berdasarkan berbagai faktor yang mempengaruhi performa *starting*. Pengaturan sudut penyalan thyristor ini bertujuan untuk mengontrol arus dan tegangan yang mengalir ke motor, sehingga lonjakan arus yang biasanya terjadi selama *starting* dapat diminimalisir. Dengan menyesuaikan sudut penyalan, motor diharapkan dapat mencapai kestabilan lebih cepat dan lebih efisien.

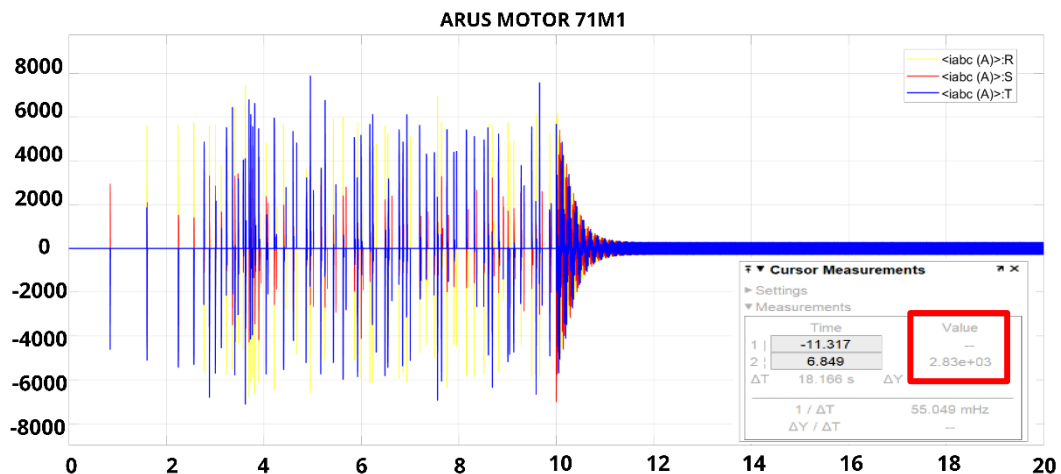
Pengaturan sudut yang berbeda antara fasa S dan fasa R serta T sesuai dengan gambar 3.5 memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja motor selama proses *starting*, di mana setiap sudut memiliki karakteristik yang berbeda dalam mengontrol arus dan tegangan yang dialirkan. Dengan demikian, pengaturan *firing angle* yang tepat menjadi salah satu pilihan untuk mencapai performa motor yang diinginkan. Adapun perhitungan yang digunakan untuk mengubah radian menjadi derajat dapat dilakukan dengan menggunakan rumus yang telah ditentukan, yaitu mengalikan nilai radian dengan faktor konversi yang sesuai dengan menggunakan persamaan 2.5 atau yang tertera pada tabel 2.1. Adapun perhitungan pengubahan radian menjadi derajat seperti berikut.

$$\text{Sudut} = \text{radian} \times \frac{180}{\pi}$$

$$\text{Sudut} = 0,5236 \times \frac{180}{3,14} = 30^\circ$$

Firing angle yang dimaksud merupakan sudut yang digunakan untuk mengontrol motor atau sistem daya AC dan berkaitan dengan pengaturan sudut dimana tegangan AC diterapkan ke beban, yang dalam hal ini adalah motor induksi. Pengaturan *firing angle* sangat penting karena secara langsung memengaruhi kinerja motor dalam hal efisiensi dan responsivitas terhadap sinyal kontrol yang diberikan. *Firing angle* ini menentukan kapan tegangan mulai diterapkan, sehingga mempengaruhi waktu dan proses dimana arus mengalir ke motor.

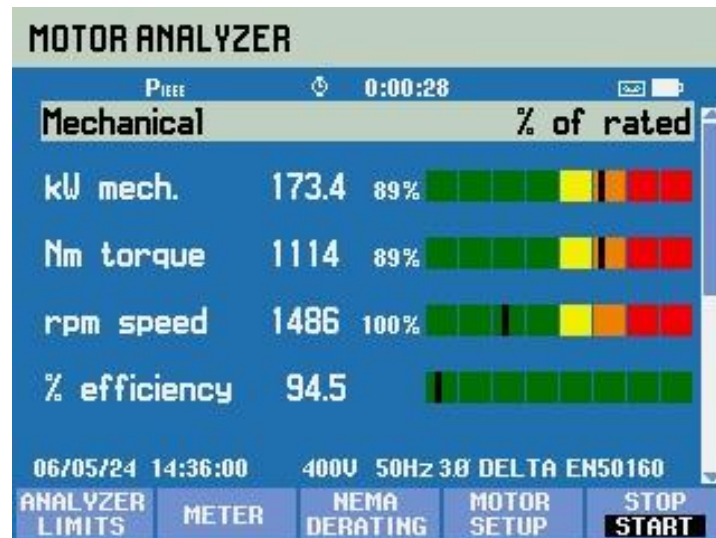
Semakin besar nilai *firing angle* yang diterapkan, maka semakin kecil arus yang dihasilkan pada motor. Hal ini disebabkan karena penundaan dalam penerapan tegangan menyebabkan berkurangnya waktu di mana arus dapat mengalir ke beban, sehingga mengurangi torsi yang dihasilkan oleh motor pada awal operasi. Sebaliknya, jika *firing angle* lebih kecil, arus yang dihasilkan akan semakin besar, memberikan lebih banyak torsi untuk memulai gerakan motor. Oleh karena itu, pemilihan *firing angle* yang tepat menjadi sangat penting untuk mengoptimalkan kinerja motor, meminimalkan lonjakan arus, dan memastikan bahwa sistem beroperasi dalam kondisi yang paling efisien. Dengan memahami hubungan antara *firing angle* dan arus yang dihasilkan, diharapkan dapat merancang sistem kontrol yang lebih baik untuk aplikasi motor induksi yang dapat meningkatkan keandalan dan umur peralatan. Dari pengaturan *firing angle* pada masing-masing fasa tersebut didapatkan arus *starting* seperti berikut.



Gambar 4.6 Arus *starting* tidakseimbang.

Gambar 4.8 terlihat bahwa arus pada fasa S (merah) cenderung memiliki *trent* atau grafik yang lebih kecil dibandingkan fasa R dan T dengan nilai rata-rata sebesar 2,830 A. Dengan begitu *firing angle* pada setiap fasa dapat mempengaruhi arus *starting* pada motor induksi karena sudut tembak atau penyalan bekerja dengan cara menahan tegangan untuk sampai menuju beban.

Ketidakseimbangan arus *starting* pada motor induksi dapat menyebabkan beberapa dampak yang cukup serius pada komponen kelistrikan termasuk motor induksi itu sendiri. Ketidakseimbangan arus dapat menyebabkan belitan stator menjadi panas, peningkatan getaran, tekanan mekanis, *overheating*, penurunan kualitas daya. Selain itu arus yang tidak seimbang dapat menyebabkan torsi berosilasi yang akan berdampak pada perubahan magnetisasi motor. Kemudian hubungan antara daya dan torsi yang berbanding lurus, motor dapat mengalami kenaikan daya dan torsi yang cukup signifikan sehingga dari hal-hal tersebut apabila dibiarkan dalam jangka waktu yang cukup lama akan menyebabkan kerusakan pada motor induksi. Dampak dari ketidakseimbangan arus *starting* pada motor 71M1 PT Krakatau Tirta Induksi menyebabkan motor memiliki vibrasi dan kebisingan yang cukup tinggi dibuktikan dengan hasil pengukuran yang tertangkap pada PQA berikut.



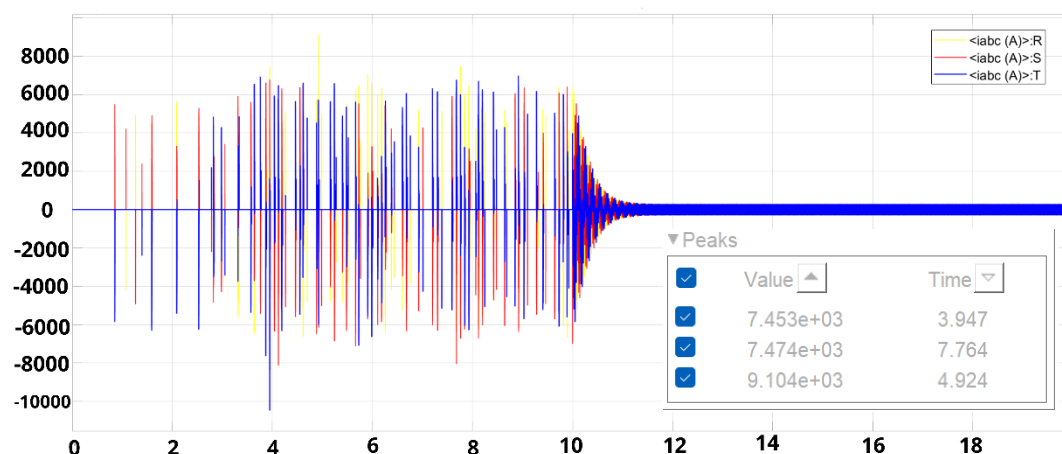
Gambar 4.7 Parameter Mekanis.

Tampilan parameter mekanis menunjukkan daya, torsi, dan kecepatan. indikator berwarna menunjukkan performa motor dibandingkan dengan ratingnya. Dapat dilihat pada gambar 4.9 bahwa peningkatan daya sebanding lurus dengan torsi motor dengan garis menunjukan bahwa keadaan berada pada warna *orange* (*serious*). Dari tampilan tersebut dapat diartikan bahwa kondisi motor cukup memprihatinkan yang berhubungan dengan usia pakai dari motor induksi itu sendiri sesuai dengan penjelasan pada gambar 2.6.

4.4.3. Dampak Resistansi Motor 71M1 Terhadap Arus *Starting*

Ketidakseimbang arus *starting* ataupun lonjakan arus dapat terjadi karena resistansi dan induktansi dari sebuah motor yang kurang baik, kurang baik yang dimaksud contohnya adalah kumparan yang memiliki resistansi dan induktansi yang kecil. Dimana resistansi dan induktansi dalam kumparan berfungsi sebagai hambatan terhadap arus listrik sehingga meminimalisir tingginya arus yang mengalir. Semakin kecil resistansi dan induktansi maka akan semakin besar arus yang mengalir sehingga dapat menyebabkan banyaknya energi yang hilang hingga motor mengalami panas berlebih yang dapat menyebabkan kerusakan. Motor induksi memiliki batas fisik yang harus diperhatikan dalam hal arus, sehingga desain resistansi dan induktansi menjadi hal yang sangat penting bagi umur motor induksi untuk menjaga keseimbangan performa dan keandalan motor.

Pada *nameplate* motor 71M1 tercatat bahwa tegangan nominal motor adalah sebesar 380 V, dengan kapasitas yang mencapai 186 kW, yang setara dengan sekitar 250 HP. Hal ini menunjukkan bahwa motor dirancang untuk beroperasi dalam sistem yang memiliki frekuensi sebesar 50 Hz. Dengan demikian pada parameter impedansi motor, nilai resistansi rotor dan stator telah diatur sesuai dengan spesifikasi teknis yang diperlukan. Dalam hal ini, nilai resistansi stator motor diatur dengan $\text{InductionMotor.Rs} = 0,02 \text{ pu}$, yang merupakan nilai yang relatif rendah, sehingga memungkinkan arus listrik mengalir dengan efisien. Selain itu, nilai induktansi stator diatur dengan $\text{InductionMotor.Ls} = 0,00011 \text{ pu}$, yang juga berkontribusi pada respons yang cepat terhadap perubahan arus. Untuk resistansi rotor nilainya ditetapkan pada $\text{InductionMotor.Rr} = 0,06 \text{ pu}$ dan induktansi rotor diatur menjadi $\text{InductionMotor.Lr} = 0,00014 \text{ pu}$. Pengaturan parameter-parameter ini sangat penting untuk memastikan bahwa motor beroperasi dalam kondisi optimal, memberikan efisiensi yang tinggi dan meminimalkan kerugian energi selama proses operasionalnya. Dengan mengikuti spesifikasi *nameplate* ini, diharapkan motor 71M1 dapat berfungsi dengan baik dalam lingkungan industri yang ada sehingga dapat memenuhi kebutuhan operasional yang diperlukan dengan andal dan efisien. Dari parameter-parameter tersebut didapatkan bentuk grafik atau arus pada simulasi sebagai berikut.



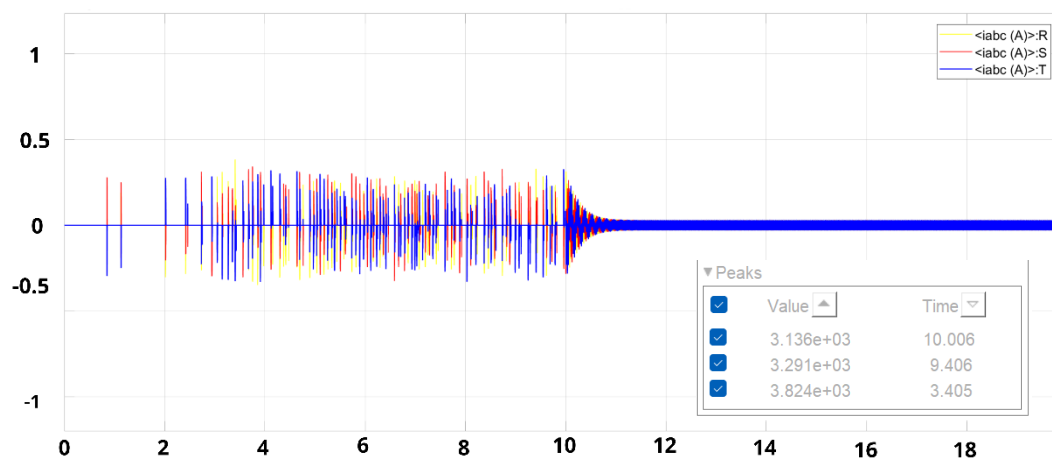
Gambar 4.8 Pengaturan Resistansi Rendah.

Dari pengaturan parameter resistansi rotor dan stator pada motor yang dianalisis melalui Simulink dapat dilihat pada Gambar 4.11 bahwa terjadi lonjakan arus yang sangat tinggi dengan nilai arus tertinggi yang tercatat mencapai 9,104 A.

Lonjakan arus yang signifikan ini menandakan adanya masalah dalam pengaturan parameter yang dapat berdampak pada efisiensi dan kinerja keseluruhan motor. Untuk mencoba membuktikan seberapa pentingnya pengaturan resistansi pada motor induksi dalam hal ini penulis mempertimbangkan untuk melakukan *rewinding* pada motor tersebut sebagai langkah perbaikan. Oleh karena itu, dilakukan pengubahan nilai resistansi rotor dan stator pada Simulink MATLAB untuk mengamati bagaimana perubahan ini akan memengaruhi arus yang mengalir dan kinerja motor secara keseluruhan. Pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai hubungan antara resistansi dan arus pada motor induksi, serta memberikan pendapat tentang bagaimana optimasi parameter ini dapat meningkatkan kinerja operasional motor di lapangan.

Dengan melakukan pengubahan nilai resistansi stator dan rotor pada motor menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan pengaturan sebelumnya, dapat diperoleh parameter baru yang diharapkan dapat memberikan dampak yang signifikan terhadap kinerja motor. Nilai resistansi stator kali ini diatur menjadi $\text{InductionMotor.Rs} = 0,04 \text{ pu}$ yang lebih besar dari nilai sebelumnya sehingga dapat mempengaruhi arus yang mengalir ke motor. Kemudian induktansi stator juga mengalami penyesuaian dengan nilai $\text{InductionMotor.Ls} = 0,00022 \text{ pu}$, yang memberikan dampak pada reaktansi motor dan dapat meningkatkan responsivitas motor terhadap fluktuasi beban.

Selain itu resistansi rotor diatur menjadi $\text{InductionMotor.Rr} = 0,12 \text{ pu}$, yang merupakan peningkatan signifikan dari nilai sebelumnya. Pengaturan ini bertujuan untuk mengoptimalkan performa motor dalam hal torsi dan efisiensi energi. Kemudian nilai induktansi rotor juga diubah menjadi $\text{InductionMotor.Lr} = 0,00024 \text{ pu}$, yang berperan sebagai pengendalian arus dan pengurangan kerugian energi selama operasi motor. Dengan parameter baru ini, diharapkan motor dapat beroperasi lebih efisien dalam kondisi tertentu, dan pengaruh dari peningkatan resistansi ini terhadap kinerja motor akan dievaluasi lebih lanjut melalui simulasi dan analisis data untuk mendapatkan wawasan yang lebih mendalam tentang dampak pengaturan resistansi yang lebih tinggi dalam sistem motor induksi. Didapatkan hasil grafik ataupun lonjakan arus *starting* pada Simulink matlab seperti berikut.



Gambar 4.9 Pengaturan Resistansi Tinggi.

Pada gambar 4.13 dapat terlihat bahwa grafik dan lonjakan arus *starting* lebih rendah dari sebelumnya dengan nilai arus tertinggi sebesar 3,824 A. Oleh karena itu pengaturan sangatlah berpengaruh terhadap lonjakan arus pada motor induksi karena cara kerjanya yang mampu menghambat arus yang mengalir pada sebuah sistem. Ada baiknya pengaturan parameter resistansi secara *actual* dapat dilakukan dengan menyesuaikan kapasitas motor yang digunakan agar sesuai dengan komponen lain sehingga nilai impedansi pada sebuah sistem dapat dikatakan baik.

Ketidakseimbangan arus *starting* yang muncul pada saat metode pengukuran dilakukan dapat diidentifikasi dengan melakukan perhitungan serta simulasi tersebut dengan memperhatikan faktor-faktor yang dapat menyebabkan arus ketidakseimbangan pada sebuah sistem dapat terjadi. Dari perhitungan serta simulasi pada Simulink matlab, adapun faktor yang memungkinkan menjadi penyebab tersebut adalah sudut penyalan atau *firing angle soft starter* yang mengatur kapan thyristor mengatur tegangan yang mengalir pada motor. Selain itu impedansi yang terdiri dari resistansi dan induktansi dari sebuah sistem perlu diperhatikan karena cara kerjanya yang dapat menghambat arus yang sangat tinggi yang dapat menyebabkan sebuah sistem mengalami *trip* atau bahkan motor induksi mengalami *overheating* hingga timbul kerusakan pada motor induksi.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa ketidakseimbangan arus seperti berikut:

1. Ketidakseimbangan arus *starting* motor induksi 3 fasa di PT Krakatau Tirta Industri disebabkan oleh ketidakseimbangan tegangan *input*, pengaturan *firing angle* thyristor, dan resistansi motor. Simulasi menunjukkan pada saat tegangan tidak seimbang sebesar 5% menghasilkan arus tidak seimbang pada fasa S dengan nilai tertinggi sebesar 4,546 A dibandingkan pada fasa R dan T nilai arusnya melebihi 6,000 A.
2. Pengubahan *firing angle* pada fasa R dan T (0,5236 rad/30°) menghasilkan lonjakan arus yang sangat besar dengan nilai tertinggi sebesar 7,912 A sedangkan fasa S (1,5708 rad/90°) memicu lonjakan arus tertinggi sebesar 2,830 A.
3. Pada pengubahan resistansi terhadap motor dengan nilai ($R_s = 0,02$ pu; $R_r = 0,06$ pu) menghasilkan arus sebesar 9,104 A, sedangkan pada saat resistansi lebih tinggi ($R_s = 0,04$ pu; $R_r = 0,12$ pu) menurunkan arus menjadi 3,824 A.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi yang telah dilakukan maka terdapat beberapa saran seperti berikut:

1. Dapat melakukan pengujian atau pengukuran lebih lanjut terhadap pengaturan *firing angle soft starter* ATS48, karena dikhawatirkan dengan seiring berjalannya waktu *firing angle* thyristor tidak lagi bekerja dengan baik atau bahkan terdapat kerusakan pada rangkaian *soft starter*.
2. Dapat melakukan pengukuran resistansi pada sistem hulu ke hilir motor 71M1 serta melakukan pengujian vibrasi pada motor menggunakan *vibration tester*.

3. Dapat melakukan kalibrasi setiap satu tahu sekali pada *Power Quality Analyzer* untuk mendapatkan keakuratan pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. N. Sukarma, I. K. Ta dan I. M. Sanjaya, "Comparison of Three Phase Induction Motor Start Using DOL, Star Delta and VSD Altivar61," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1, 2020.
- [2] Z. Cao, J. Shi dan B. Fan, "Induction Motor Pre-excitation Starting Based on vector Control with Flux Linkage Deviation Decoupling," *Journal of Vibroengineering*, vol. 23, no. 3, 2021.
- [3] A. Ghufra, I. M. Ari Nnatha dan S. Nababan, "Analysis of Soft Starting using Anti Parallel SCR for 3 Phase Induction Motor 15 kW," *Dielektrika*, vol. 7, no. 2, 2020.
- [4] S. Grover dan M. Mankar, "Minimization of Starting Torque and Inrush Current of Induction Motor by Different Starting Methods using MATLAB/SIMULINK," *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*, vol. 3, no. 3, 2019.
- [5] S. A. Deraz dan H. Z. Azazi, "Current Limiting Soft Starter for Three Phase Induction Motor Drive System using PWM AC," *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 11, 2017.
- [6] F. N. Winarto, T. Sukmadi and M. Facta, "Perancangan Modul Dan Perbandingan Metode Starting Dan Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa," *TRANSIENT*, vol. 4, no. ISSN: 2302-9927, 2015.
- [7] R. Zira dan P. Endi, "Analisis Pengasutan Motor Jenis Variable Speed Drive (VSD) Dan Soft Starter Pada Fan Cooler Sistem Di PT. Cemindo Gemilang Tbk Bayah," *Jurnal Riset Rumpun Ilmu Teknik (JURRITEK)*, Vol. 1, no. 2, 2022.
- [8] F. Falah, "Anallisa Perbandingan Starting Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Metode Pengasutan DOL (Direct On Line) Dengan Metode

- Pengasutan Soft Starter Pada Belt Conveyor," Mercu Buana University Institutional Repository, Jakarta, 2017.
- [9] N. Juliana, "Analisa Starting Motor Induksi 3 Fasa Motor FC-PM-21 Dan Motor Cooling Tower 2210 JCM/JDM Di PT. Pertamina Refinery Unit III Plaju-Sungai Gerong Palembang," Universitas Sriwijaya, Palembang, 2018.
 - [10] F. N. Winarto, T. Sukmadi dan M. Facta, "Perancangan Modul Dan Perbandingan Metode Starting Dan Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa," TRANSIENT, vol. 4, no. 1, 2015.
 - [11] Siswoyo, Teknik Listrik Industri, Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, 2008.
 - [12] T. Wildi, Electrica Machines, Drives, And Power System, New Jersey: Pearson Education Inc, 2002.
 - [13] N. Mohan, T. M. Undeland dan W. P. Robbins, Power Electronic Converters, Applications and Design, Minnesota: John Willey and Sons inc, 2002.
 - [14] D. Novianto, E. Zondra dan H. Yuvendius, "Analisis Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Vacuum Di PT. Pindo Deli Perawang," SainETIn (Jurnal Sain, Energi, Teknologi & Industri), vol. 4, no. 2, 2022.
 - [15] M. Muhaimin, "Perancangan Sistem Pengendalian Kecepatan Putar Motor Induksi Menggunakan Kontroler Neuro PID," Proceeding Seminar Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS, vol. 1, no. 2, 2016.
 - [16] F. Umam, H. Budiarto dan A. Dafid, Motor Listrik, Malang: Media Nusa Creative, 2017.
 - [17] Devianto, "Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Parameter Listrik dan Harmonisa Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Elevator Gedung Kasuari PT. Multi Prada Mandiri," Universitas Semarang, Semarang, 2021.

- [18] Fluke, 438-II Motor Analyzer User Manual, Everett: Fluke Corporation, 2016.
- [19] F. Umam, H. Budiarto dan A. Dafid, Motor Listrik, Malang: Media Nusa Creative, 2017.
- [20] Devianto, “Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Parameter Listrik dan Harmonisa Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Penggerak Elevator Gedung Kasuari PT. Multi Prada Mandiri,” Universitas Semarang, Semarang, 2021.
- [21] Maharashtra, “Degrees To Radians,” BYJU's, 7 August 2022. [Online]. Available: <https://byjus.com/maths/degrees-to-radians/>. [Diakses 23 July 2024].
- [22] M. I. Putra Naibaho, I. K. Wijaya dan I. M. Mataram, “Studi Analisis Perbandingan Metode Starting Direct On Line (DOL) dan Variable Speed Drive (VSD) Pada Motor Fan Untuk Cooling Tower Di PT. Rapp (Riau Andalan Pulp Paper),” Jurnal SPEKTRUM, vol. 8, no. 1, 2021.
- [23] NEMA, NEMA Standards Publication MG 1-1998, Virginia: National Electrical Manufacturers Association, 2002.
- [24] A. Nurmalitawati dan A. Rahardjo, “Analisis Perbandingan Besarnya Arus Start Motor Induksi Berkapasitas Besar Terhadap Jatuh Tegangan Bus,” FT UI, vol. 3, no. 2, 2014.
- [25] A. Hutapea, “Analisis Perbandingan Pengasutan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Rotor Sangkar Tupai,” Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, 2021.
- [26] R. Saidur, S. Mekhilef, M.B. Ali, A. Safari, H.A. Mohammed, “Applications of Variable Speed Drive (VSD) in Electrical Motors Energy Savings,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 1, 2012.
- [27] Tarmizi, “Desain Sistem Kontrol Sudut Penyalaan Thyristor Komutasi Jaringan Berbasis Mikrokontroler PIC 16F877,” Jurnal Rekayasa Elektrika, vol. 9, no. 1, 2010.

- [28] Jhonson, Method and Apparatus for Firing angle Control of Series Connected Thyristor Switches, United States: United States Patent, 1987.
- [29] A. Hakim, “Analisis Pengaruh Arus Tidak Seimbang Terhadap Kerja Motor Induksi Tiga Fasa,” Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, 2020.
- [30] A. Junaidi dan S. Damayanti, “Analisis Efektifitas Penggunaan Metode Soft Starter Saat Start Awal Pada Pengoperasian Motor 220 kW,” Energi dan Kelistrikan: Jurnal Ilmiah, vol. 11, no. 2, 2019.
- [31] H. Naldi, E. Zondra dan H. Yuwendius, “Studi Pengaruh Pemasangan Soft Starter Motor Induksi Tiga Fasa Pada Tisu Machine Di PT. Pindo Deli Perawang,” Jurnal Teknik, vol. 15, no. 2, 2021.
- [32] N. C. Edy Wibowo, W. Handajadi dan S. , “Analisa Starting Motor Induksi 3 Fasa Dengan Menggunakan Program Di PT Madubaru Yogyakarta,” Jurnal Elektrikal, vol. 1, no. 1, 2014.

LAMPIRAN A

DOKUMENTASI PENELITIAN

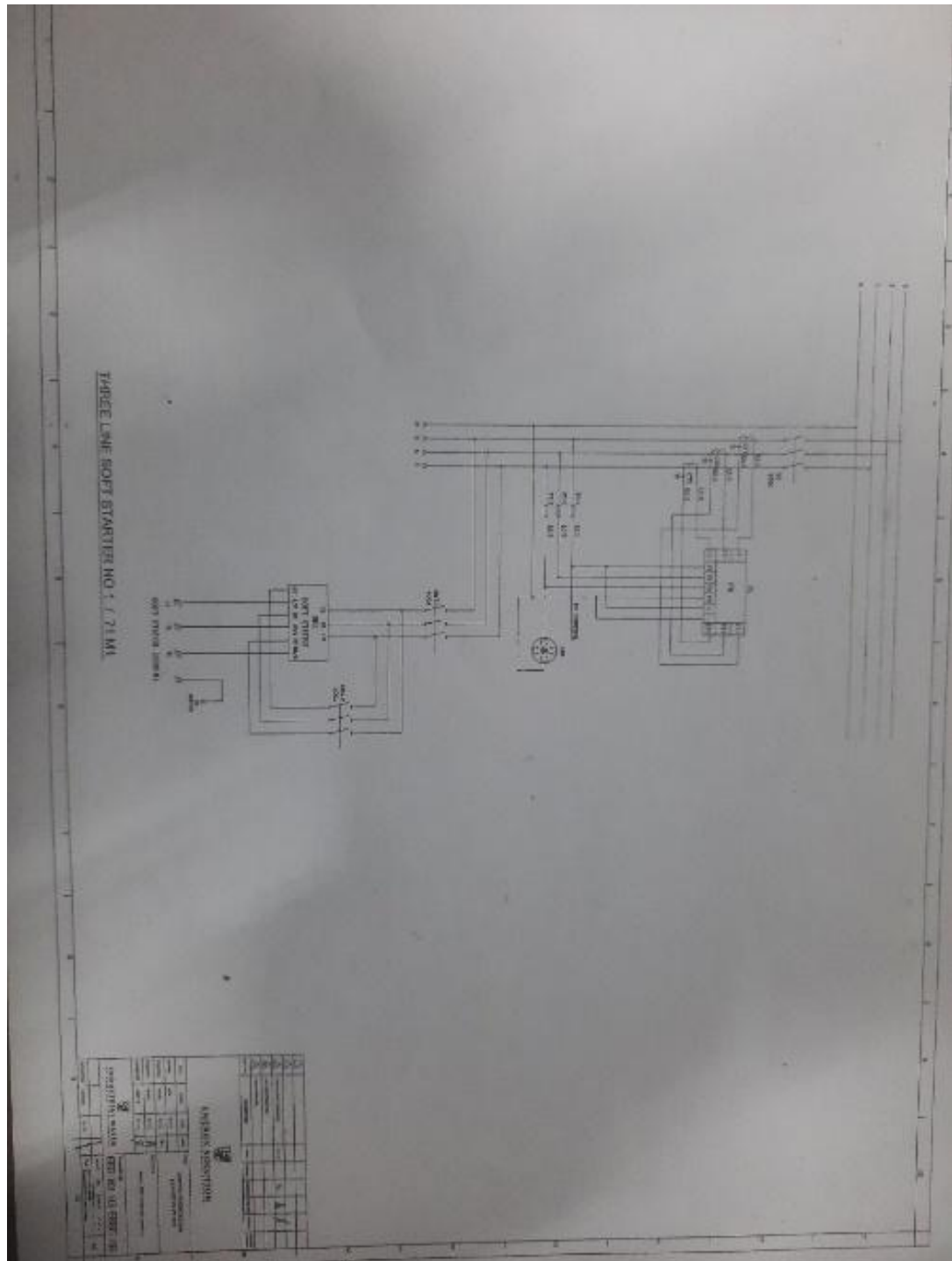
1. Teknik pengambilan data menggunakan PQA



2. Dokumentasi pada motor distribusi



3. Rangkaian ekisting soft starter motor 71M1.



LAMPIRAN B

DATA SPESIFIKASI KOMPONEN

Tabel B.1 Spesifikasi motor 71M1.

Parameter	Spesifikasi
Pabrikasi	GE Industries
Type	5KS449SAJ6048
Tegangan Nominal (V)	380 V
Arus Nominal (A)	336 A
Frekuensi (Hz)	50 Hz
Daya (kW / HP)	186 kW / 250 HP
Kecepatan (RPM)	1490 RPM
Faktor Daya (Cos ϕ)	0.88
Code letter	H
Metode Starting	Soft Starter
InductionMotor.Rs	0.02
InductionMotor.Ls	0.00011
InductionMotor.Rr	0.06
InductionMotor.Lr	0.00014

Table B.2 Spesifikasi softstarter ATS48

Parameter	Spesifikasi
Model	Schneider ATS48C41Y
Tegangan Operasi	208V hingga 690V AC
Frekuensi Operasi	50 Hz / 60 Hz
Daya Motor Maksimum	110 kW hingga 900 kW / 1250 HP
Arus Nominal	17A hingga 1200A (tergantung pada model spesifik)
Tipe Motor	Motor induksi 3 fasa
Suhu Operasi	-10°C hingga +60°C