

SKRIPSI

**STUDI PENGASUTAN MOTOR *MAIN DRIVE FINISH MILL V*
MENGUNAKAN *LIQUID ROTOR STARTER* PADA PT
SEMEN TONASA**

Disusun dan diajukan oleh :

FITMAN PASENGGONG

D041 19 1095



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

GOWA

2023



Optimized using
trial version
www.balesio.com

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**STUDI PENGASUTAN MOTOR *MAIN DRIVE FINISH MILL V*
MENGUNAKAN *LIQUID ROTOR STARTER* PADA PT SEMEN
TONASA**

Disusun dan diajukan oleh

Fitman Pasenggong

D041191095

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 5 Februari 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Ir. Masning, M.T.
NIP 196007201987021001


Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D
NIP 197703222005011001

Ketua Program Studi,


Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T. IPM
NIP 19691026 199412 2 001



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Fitman Pasenggong

NIM : D041191095

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

STUDI PENGASUTAN MOTOR *MAIN DRIVE FINISH MILL V* MENGUNAKAN *LIQUID ROTOR STARTER* PADA PT SEMEN TONASA

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 13 Maret 2024

ang Menyatakan



Fitman Pasenggong



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena kasih dan limpahan berkat-Nya yang tidak pernah putus sedetik pun, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Studi Pengasutan Motor *Main Drive Finish Mill V* Menggunakan *Liquid Rotor Starter* Pada PT Semen Tonasa”.

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu persyaratan kelulusan pada Pendidikan Strata (S1) Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dalam penyempurnaan penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari dalam penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga tercinta yaitu Ayahanda Kamril Pasenggong dan Ibunda Marlina Bantjong, saurada tersayang Capriany Elika Pasenggong beserta suami dan anaknya, Ariesta Dwiwana Pasenggong, dan Marchy Emanuella Pasenggong yang selalu memberi motivasi, dukungan, dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
 2. Bapak Ir. Gassing, M.T. selaku dosen pembimbing I dan Bapak Yusri Syam Akil, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktunya untuk memberi bimbingan, ide, dan saran dalam penulisan skripsi ini.
 3. Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T. selaku dosen penguji I dan Bapak Dr. Yusran, S.T., M.T. selaku dosen penguji II yang telah meluangkan waktunya untuk menguji penulis serta memberikan kritik dan saran dalam penulisan skripsi ini.
 4. Bapak/Ibu dosen dan seluruh staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan banyak ilmu maupun pengalaman yang sangat membantu selama proses kuliah dan juga penyusunan skripsi ini.
- terima kasih kepada pimpinan PT Semen Tonasa, khususnya para karyawan pada divisi



Electrical Instrumens Maintenance II di *Finish Mill V* yang telah memberikan izin penelitian dan juga sangat banyak membantu dan membimbing penulis dalam proses penelitian.

6. Saudara seperjuangan di Lab Riset Mesin-Mesin Listrik (Zity Aida dan Dwi Rifki) yang selalu saling mendukung satu sama lain dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai.
7. Saudara TR19GER yang menjadi teman sekaligus saudara selama proses perkuliahan yang memberikan banyak bantuan, dukungan, dan kisah yang menjadi kenangan manis selama proses perkuliahan.
8. Pasukan berani mati takut lapar (Gabriel, Dwi, Dhedy, Ochang, Richard, Kaka, Adeq, Raste, Mahendra, Bogel) yang menjadi keluarga kedua bagi penulis di tanah rantau ini, memberikan banyak bantuan, dukungan serta pengalaman hidup yang berkesan selama masa perkuliahan.
9. Seluruh pihak yang telah memberi bantuan, dukungan serta doa yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini memberikan manfaat baik bagi kita semua dan semoga lindungan Tuhan Yang Maha Kuasa selalu ada Bersama kita.

Gowa, 25 Desember 2024

Penulis



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRAK

FITMAN PASENGGONG. *Studi Pengasutan Motor Main Drive Finish Mill V Menggunakan Liquid Rotor Starter Pada PT Semen Tonasa* (dibimbing oleh Gassing dan Yusri Syam Akil)

Hampir seluruh kegiatan operasi di PT Semen Tonasa digerakkan oleh motor listrik jenis motor induksi. Kendala dari penggunaan motor induksi adalah dimana pada saat pengasutan awal motor akan menyerap arus lebih hingga 500 sampai 700 persen dari arus beban penuh. Kondisi ini dapat mengakibatkan terjadinya gangguan pada saluran sehingga akan membuat peralatan lain yang terhubung pada saluran yang sama akan terganggu bahkan bisa sampai rusak. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik motor induksi sebagai penggerak utama (*main drive*) dari mesin penggiling semen pada *finish mill V* pada saat pengasutan dengan menggunakan *liquid rotor starter* sebagai tahanan luar saat pengasutan. Dari hasil perhitungan yang dilakukan, motor menghasilkan karakteristik arus asut 450 % dari arus nominalnya, yaitu ± 2.789 Ampere untuk metode tahanan luar, ± 4.438 Ampere untuk *direct on line*, ± 1.902 Ampere untuk wye-delta, dan ± 1.268 Ampere untuk *soft starter* pada kondisi material penuhnya. Selain itu, *liquid rotor starter* memberikan nilai torsi pengasutan sebesar ± 158 % dari torsi minimal yang dibutuhkan saat pengasutan yaitu sebesar 120 %, dan juga memberikan nilai efisiensi terhadap motor *main drive* sebesar 87,364 %.

Kata kunci : Motor induksi, pengasutan, *liquid rotor starter*, *main drive*.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRACT

FITMAN PASENGGONG. *Study of Finish Mill V Main Drive Motor Starting Using Liquid Rotor Starter at PT Semen Tonasa (supervised by Gassing and Yusri Syam Akil).*

Almost all operations at PT Semen Tonasa are driven by induction motor type electric motors. The obstacle of using an induction motor is where at the time of initial starting the motor will absorb more current up to 500 to 700 percent of the full load current. This condition can cause a disturbance in the channel so that it will make other equipment connected to the same channel will be disturbed and can even be damaged. This study aims to determine the characteristics of the induction motor as the main drive of the cement grinding machine at the finish mill V when starting using a liquid rotor starter as an external resistance when starting. From the results of the calculations carried out, the motor produces a 450% starting current characteristic of its nominal current, which is $\pm 2,789$ Amperes for the external resistance method, $\pm 4,438$ Amperes for direct on line, $\pm 1,902$ Amperes for wye-delta, and $\pm 1,268$ Amperes for soft starter in its full material condition. In addition, the liquid rotor starter provides an starting torque value of $\pm 158\%$ of the minimum torque required when starting which is 120%, and also provides an efficiency value for the main drive motor of 87.364%.

Keyword : Induction motor, starting, liquid rotor starter, main drive.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
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 Ruang Lingkup.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Umum	5
2.2 Vertical Mill pada Finish Mill	7
2.3 Motor Induksi.....	9
2.3.1 Klasifikasi motor induksi.....	10
2.3.2 Konstruksi motor induksi	11
2.3.3 Prinsip kerja motor induksi.....	12
2.3.4 Medan putar.....	13
2.3.5 Slip dan frekuensi rotor pada motor induksi	14
2.3.6 Torsi pada motor induksi	15
2.3.7 Spesifikasi motor <i>main drive</i>	16
2.4 Pengasutan Motor Induksi.....	17
2.4.1 <i>Direct on line</i> (DOL).....	18
2.4.2 Wye-Delta	18
2.4.3 <i>Autotrafo</i>	19
2.4.4 <i>Soft starter</i>	20
2.4.5 <i>Variable frequency drive</i> (VFD).....	21
2.4.6 Tahanan luar atau tahanan rotor.....	22



2.5	<i>Liquid Rotor Starter (LRS)</i>	22
2.5.1.	Prinsip kerja <i>liquid rotor starter</i>	24
2.5.2.	Bagian-bagian pada <i>liquid rotor starter</i>	24
2.5.3.	Prinsip elektrokima pada <i>liquid rotor starter</i>	26
2.5.4.	Spesifikasi <i>liquid rotor starter</i>	28
2.6	Equipment Pendukung dan Spesifikasinya	29
2.6.1	Transformator	29
2.6.2	<i>Switchgear</i>	30
BAB III METODE PENELITIAN		34
3.1	Waktu dan Lokasi Penelitian	34
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	34
3.3	Teknik Pengumpulan Data	34
3.4	Diagram Alir Penelitian.....	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		38
4.1	Pemilihan Metode Pengasutan Motor <i>Main Drive</i>	38
4.2	Analisis Arus Pengasutan Motor <i>Main Drive</i>	39
4.2.1.	Perhitungan arus pengasutan	40
4.2.2.	Perbandingan arus pengasutan pada berbagai metode	43
4.3	Analisis Torsi Motor <i>Main Drive</i>	47
4.4	Analisis Nilai Tahanan Luar <i>Liquid Rotor Starter</i>	52
4.5	Efisiensi <i>Liquid Rotor Starter</i> Terhadap Motor <i>Main Drive</i>	56
BAB V SIMPULAN DAN SARAN		61
5.1	Simpulan	61
5.2	Saran	62
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN.....		65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Clinker (Sumber : PT Semen Tonasa).....	7
Gambar 2 <i>Vertical mill</i> (a), bagian-bagian pada <i>vertical mill</i> (b).....	8
Gambar 3 Klasifikasi bagian pada <i>vertical mill</i> berdasarkan proses.....	9
Gambar 4 Klasifikasi motor listrik.....	11
Gambar 5 Konstruksi motor induksi.....	11
Gambar 6 Stator (a), konstruksi lilitan 3 fasa pada stator (b).....	12
Gambar 7 Rotor sangkar tupai (a), rotor belitan (b).....	12
Gambar 8 Bentuk gelombang sinusoidal dan timbulnya medan putar.....	13
Gambar 9 Motor main drive.....	17
Gambar 10 Rangkaian pengasutan langsung (DOL) pada motor induksi.....	18
Gambar 11 Rangkaian pengasutan wye-delta pada motor induksi.....	19
Gambar 12 Rangkaian pengasutan <i>autotrafo</i> pada motor induksi.....	20
Gambar 13 Rangkaian pengasutan <i>soft starter</i> pada motor induksi.....	21
Gambar 14 Rangkaian pengasutan <i>variable frequency drive</i> pada motor induksi.....	21
Gambar 15 Rangkaian pengasutan tahanan luar pada motor induksi.....	22
Gambar 16 Komponen penyusun <i>liquid rotor starter</i>	25
Gambar 17 <i>Nameplate liquid rotor starter</i>	28
Gambar 18 <i>Nameplate</i> transformator.....	30
Gambar 19 <i>Switchgear</i>	31
Gambar 20 Diagram alir penelitian.....	36
Gambar 21 Diagram alir perhitungan dan analisis data.....	37
Gambar 22 Gambar ekivalen motor induksi.....	40
Gambar 23 Gambar percobaan motor induksi tanpa beban.....	41
Gambar 24 <i>Trend</i> arus motor main drive ketika pengasutan.....	42
Gambar 25 Perbandingan arus asut.....	44
Gambar 26 Grafik hubungan <i>feed</i> terhadap daya.....	47
27 Grafik hubungan torsi terhadap daya.....	51
28 Sistem kerja <i>liquid rotor starter</i>	54
29 Aliran daya pada motor induksi 3 fasa.....	57



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Spesifikasi motor <i>main drive</i>	16
Tabel 2 Spesifikasi <i>liquid rotor starter</i>	28
Tabel 3 Spesifikasi transformator	29
Tabel 4 Spesifikasi <i>switchgear</i>	30
Tabel 5 Perbandingan metode pengasutan.....	38
Tabel 6 Perbandingan arus asut pada berbagai metode pengasutan	44
Tabel 7 Data <i>feed</i> dan daya motor pada pengasutan beban nol	45
Tabel 8 Hasil perhitungan torsi pada pengasutan beban nol.....	49
Tabel 9 Tabel pengujian tahanan larutan <i>liquid rotor starter</i>	53



Optimized using
trial version
www.balesio.com

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada awal terjadinya revolusi industri, manusia masih menggunakan mesin uap sebagai sumber tenaga untuk menggerakkan mesin-mesin produksinya. Seiring dengan perkembangan zaman, ditemukannya listrik pada revolusi industri 2.0 mendorong perkembangan secara massal mesin-mesin produksi. Pertumbuhan jumlah manusia pun tentunya akan berdampak langsung pada jumlah kebutuhan barang produksi, baik dari sisi jumlah maupun ragamnya. Kebutuhan barang dalam jumlah yang besar dan beraneka ragam tersebut, mendorong para ilmuwan untuk terus melakukan penelitian guna memperoleh sumber tenaga lain yang lebih mudah penggunaannya, hingga ditemukannya mesin-mesin konversi tenaga listrik tersebut, seperti motor listrik (Bijaksana et al, 2021)

Berkaitan dengan motor listrik, penggunaannya sampai saat ini dipakai untuk menggerakkan mesin-mesin produksi salah satunya pada pabrik produksi semen PT Semen Tonasa. PT Semen Tonasa merupakan pabrik produsen semen terbesar di kawasan timur Indonesia yang mempunyai lahan seluas 1.571 hektar di Desa Biring Ere, Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkep, dengan jarak sekitar 68 kilometer dari kota Makassar. Perusahaan ini memiliki kapasitas terpasang 5.980.000 ton semen per tahunnya, dan mempunyai empat unit pabrik, yaitu Pabrik Tonasa unit II, III, IV dan unit V. Pabrik ini diperkirakan akan terus beroperasi dan berkontribusi pada perekonomian nasional hingga beberapa puluh tahun ke depan dengan persediaan bahan baku yang berlimpah (PT Semen Tonasa, 2021).

Salah satu komponen terpenting dalam operasional PT Semen Tonasa yaitu motor listrik. Hampir seluruh kegiatan operasi di PT Semen Tonasa digerakkan oleh motor listrik jenis motor induksi. PT Semen Tonasa yang telah berdiri sejak lama dan yang akan diperkirakan akan terus berproduksi sampai puluhan tahun ke depan tentu harus memperhatikan seluruh kondisi peralatan-peralatan yang digunakan dalam proses produksi secara khusus motor induksinya. Secara umum, motor dapat dioperasikan baik secara langsung dari sumber daya maupun dengan metode pengasutan yang digunakan selama periode *start*. Kendala dari



penggunaan motor induksi adalah dimana pada saat *starting* motor akan menyerap arus lebih hingga 500 sampai 700 persen dari arus beban penuh. Kondisi ini dapat mengakibatkan terjadinya gangguan jatuh tegangan pada saluran sehingga akan membuat peralatan lain yang terhubung pada saluran yang sama akan terganggu bahkan bisa sampai rusak. Untuk motor induksi berkapasitas besar, tentu tidak dianjurkan untuk menghidupkan motor secara langsung. Oleh karena itu dibutuhkan suatu metode pengasutan untuk menghindari lonjakan arus saat menghidupkan motor tersebut. Ada beberapa metode pengasutan motor yang dapat digunakan untuk menurunkan arus *starting*, diantaranya adalah metode *start* secara langsung DOL (*Direct On Line*), *wye-delta*, *primary resistor*, *autotrafo*, *soft starter*, VFD (*Variable Frequency Drive*), dan *start* dengan *slip ring* atau tahanan luar (Siswoyo, 2008).

Di PT Semen Tonasa itu sendiri khususnya pada unit *finish mill V*, mesin *mill* digerakkan oleh motor *main drive* dengan spesifikasi motor induksi 3 fasa jenis rotor belitan dengan daya listrik sebesar 5.500 kilowatt (kW), tegangan input 6.000 volt (V), dan berat motor sebesar 18.850 kilogram (kg). Dengan kapasitas motor yang sebesar ini, tentu akan menimbulkan arus *start* yang sangat tinggi dan akan memberikan dampak yang sangat merugikan bagi peralatan jika motor dihidupkan langsung tanpa meredam lonjakan arusnya. Oleh karena itu, unit *finish mill* ini menghidupkan motor penggerak utamanya menggunakan pengasutan metode tahanan luar. Tahanan luar yang dimaksudkan disini yaitu menggunakan media *liquid* untuk memberikan nilai resistansi saat periode *starting* motor yang dikenal dengan istilah *liquid rotor starter*. Untuk mengetahui karakteristik motor induksi saat melakukan pengasutan dan juga seberapa efektif penggunaan metode tahanan luar, maka dibutuhkan analisa dan perhitungan yang tepat. Oleh karena itu, penulis bermaksud melakukan penelitian dengan mengangkat judul “Studi Pengasutan Motor *Main Drive Finish Mill V* Menggunakan *Liquid Rotor Starter* Pada PT Semen Tonasa”.



Rumusan Masalah

·dasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana nilai lonjakan arus saat pengasutan motor *main drive finish mill* pada PT Semen Tonasa Unit V jika menggunakan metode asut tahanan luar (*liquid rotor starter*), *direct on line*, *wye-delta*, dan *soft starter*?
2. Bagaimana nilai torsi motor *main drive finish mill* pada PT Semen Tonasa Unit V jika ditinjau dari perubahan nilai daya (kW) motor dan pembebanan dari motor itu sendiri?
3. Bagaimana sistem kerja dari *liquid rotor starter* saat pengasutan motor *main drive finish mill* pada PT Semen Tonasa Unit V?
4. Bagaimana efisiensi dari motor *main drive* terhadap penggunaan *liquid rotor starter* pada *finish mill* PT Semen Tonasa Unit V?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui nilai lonjakan arus saat pengasutan motor *main drive finish mill* pada PT Semen Tonasa Unit V jika menggunakan metode asut tahanan luar (*liquid rotor starter*), *direct on line*, *wye-delta*, dan *soft starter*.
2. Mengetahui nilai torsi motor *main drive finish mill* pada PT Semen Tonasa Unit V jika ditinjau dari perubahan nilai daya (kW) motor dan pembebanan dari motor itu sendiri.
3. Mengetahui sistem kerja dari *liquid rotor starter* saat periode start motor *main drive finish mill* pada PT Semen Tonasa Unit V.
4. Mengetahui efisiensi dari motor *main drive* terhadap penggunaan *liquid rotor starter* pada *finish mill* PT Semen Tonasa Unit V.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan ini diharapkan memberi manfaat yaitu sebagai acuan atau referensi bagi peneliti mengenai pengasutan motor induksi khususnya metode tahanan luar menggunakan *liquid rotor starter*.



ang Lingkup

ang lingkup penelitian ini melingkupi hal-hal sebagai berikut:

1. Motor *main drive finish mill V* pada PT Semen Tonasa yang diteliti yaitu motor induksi tiga fasa jenis rotor belitan merek ABB, memiliki spesifikasi daya listrik sebesar 5.500 kilowatt (kW), tegangan input 6.000 volt (V), dan berat motor sebesar 18.850 kilogram (kg).
2. Penelitian terbatas hanya pada saat periode pengasutan motor.
3. *Liquid rotor starter* yang diteliti merupakan tahanan luar untuk pengasutan dari motor *main drive finish mill V* pada PT Semen Tonasa.
4. Motor induksi tiga fasa rotor belitan yang diteliti dalam keadaan seimbang.
5. Kondisi motor *main drive* terkopel dengan mesin *mill* pada kondisi material kosong, dianggap kondisi beban nol.
6. Perbandingan arus asut untuk metode *direct on line*, *wye-delta*, dan *soft starter* diambil dari referensi yang ada.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan teori-teori relevan yang mendukung penelitian yang meliputi *vertical mill* pada *finish mill*, motor induksi, pengasutan motor listrik, dan *liquid rotor starter*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, teknik pengumpulan data, dan diagram alir penelitian.



Optimized using
trial version
www.balesio.com

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Umum

Pada pabrik semen PT Semen Tonasa, hampir seluruh proses produksinya digerakkan menggunakan motor listrik. Dari semua motor listrik tersebut, sekitar 95% menggunakan motor listrik jenis motor induksi. Karena diinginkan efisiensi dan ketahanan motor listrik yang tinggi, maka pemilihan motor harus sesuai dengan kebutuhan atau kegunaannya yang ditinjau dari jenis motor, spesifikasi elektrik dan mekanik, serta cara pengoperasiannya. Misalnya untuk karakteristik perputaran torsi, kecepatan putar, kemampuan nominal, frekuensi, jumlah fasa, dan juga sistem pengendalian dari motor tersebut sampai sistem proteksinya harus disesuaikan dengan kebutuhan gerak dimana motor listrik tersebut digunakan. Perlu juga diperhatikan ketahanan motor tersebut karena digunakan pada pabrik semen yang pastinya mengalami masalah debu.

Agar lebih mudah memahami lebih lanjut mengenai motor listrik yang ada di pabrik semen, maka perlu diketahui terlebih dahulu proses pembuatan semen walaupun hanya secara garis besarnya saja. Hal tersebut nantinya agar diketahui bentuk-bentuk beban yang akan dipikul oleh motor-motor listrik tersebut.

Adapun proses pembuatan semen secara umum pada PT Semen Tonasa yang terdiri dari bahan baku atau bahan mentah yaitu batu kapur, tanah liat, pasir silika, dan gypsum. Pengadaan batu kapur dan tanah liat diperoleh dari penambangan di area sekitar pabrik yang dimana pabrik ini didukung oleh kekayaan bahan baku yang melimpah. Untuk proses pembuatannya ada beberapa tahapan mulai dari penambangan bahan baku hingga jadi produk semen yang siap didistribusikan. Tahapan-tahapan produksi semen terjadi mulai dari *quarry*, *crusher*, *raw mill*, *kiln*, *finish mill*, hingga *packing*.

1. Quarry



Quarry merupakan lokasi pertambangan bahan baku yang terletak dekat dengan pabrik. Proses penambangan bahan baku batu kapur dilakukan dengan penambangan terbuka yang dimana menggunakan metode peledakan yang terkontrol untuk memecahkan batu yang sangat besar menjadi bagian lebih kecil.

Kemudian hasil pecahan batu kapur tersebut diangkut menggunakan mobil truk menuju *crusher*.

2. *Crusher*

Material yang masuk ke dalam *crusher* yang masih berukuran besar akan dipecah-pecahkan atau dihancurkan menjadi bagian yang lebih kecil sekitar 5-8 cm. Selanjutnya material yang berbentuk kerikil tersebut dibawa ke proses selanjutnya di *raw mill*.

3. *Raw mill*

Raw mill merupakan tempat dimana material batu kapur kemudian digiling dari ukuran sebelumnya menjadi partikel debu. Pada *raw mill* ini juga bahan baku tersebut dicampur dengan tanah liat dan pasir silika. Selain penggilingan, pada *raw mill* juga terjadi proses pengeringan untuk mengurangi kelembaban dari material. Hasil dari proses pada *raw mill* ini dinamakan *raw meal*. *Raw meal* ini nantinya akan dibakar pada *kiln*.

4. *Kiln*

Kiln merupakan tempat pembakaran *raw meal* menjadi bahan setengah jadi. Setelah proses pembakaran, kemudian hasilnya akan didinginkan sebelum masuk ke penampungan. Hasil dari proses pada kiln ini berupa produk setengah jadi yang disebut *clinker*. *Clinker* ini juga merupakan produk yang sudah bisa dipasarkan. *Clinker* kemudian disimpan di kubah penyimpanan yang bernama *dome*. Setelah itu, *clinker* di *transport* ke bin *feeder* untuk di campur dengan material tambahan lainnya sebelum masuk ke *finish mill*.



Optimized using
trial version
www.balesio.com



Gambar 1 *Clinker*
(Sumber : PT Semen Tonasa)

5. *Finish mill*

Finish mill merupakan tempat proses akhir dari produksi semen sebelum dikemas dan dipasarkan. Pada *finish mill*, material yang terdiri dari *clinker*, trass, gypsum, dan bahan tambahan lainnya seperti *fly ash* atau pozzolan, dicampur dan digiling menjadi material yang sangat halus bernama semen. Kemudian produk semen tersebut akan ditransport ke menara penampungan semen yang disebut silo. Produk semen dapat dipasarkan secara curah yang diambil langsung dari silo, atau pun masuk lagi ke proses pengemasan.

6. *Packing*

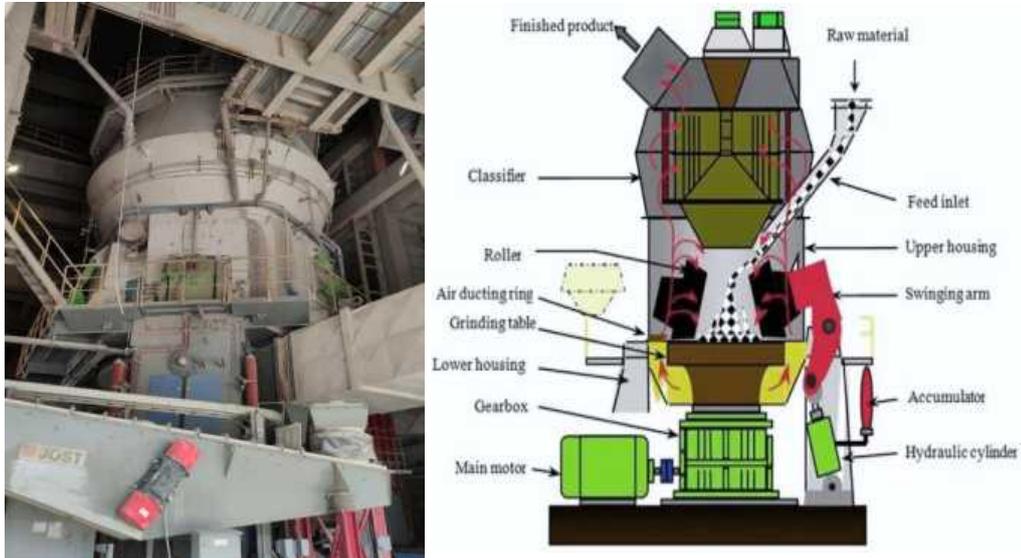
Produk semen yang dipasarkan terdiri dari semen curah maupun yang dikemas. Pengemasan semen pada PT Semen Tonasa dibagi menjadi beberapa kategori yaitu kemasan 40 kg, 50 kg, 1 ton dan juga 2 ton. Setelah dikemas, produk semen siap didistribusikan.

2.2 *Vertical Mill pada Finish Mill*

Finish Mill merupakan tempat terjadinya penggilingan akhir pada proses in semen. Proses di *finish mill* menggunakan material *clinker*, batu kapur, lan trass sebagai inputnya. Material-material tersebut berasal dari masing-orage yang melalui proses penimbangan *weighfeeder* untuk menentukan



komposisi semen yang kemudian akan dibawa oleh alat *transport* material menuju ke *finish mill*. Mekanisme penggilingan yang terjadi pada *finish mill* tergantung pada jenis mill yang digunakan. Mesin *mill* digerakkan oleh sebuah motor induksi berkapasitas besar sebagai penggerak utama. Jenis motor yang digunakan yaitu motor induksi 3 fasa rotor belitan. Salah satu jenis mesin *mill* yaitu *vertical mill*.



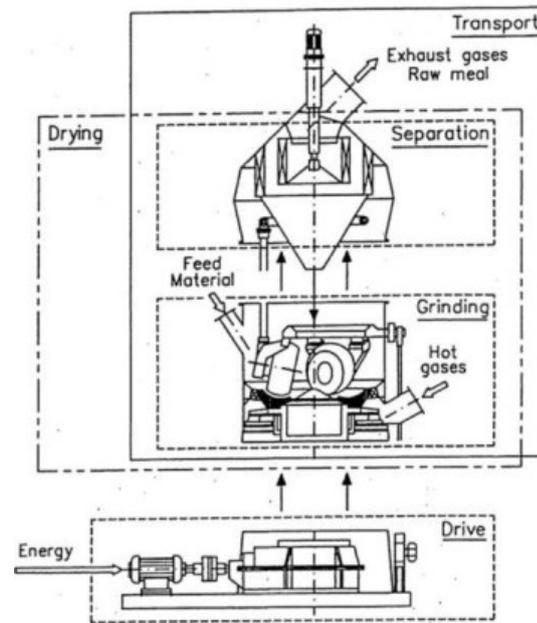
Gambar 2 *Vertical mill* (a), bagian-bagian pada *vertical mill* (b)

(Sumber: PT Semen Tonasa (a), <https://indonesian.alibaba.com/product-detail/dry-process-cement-grinding-vertical-roller-60274996205.html> (b))

Vertical Mill merupakan jenis mesin *mill* yang digunakan untuk menggiling dan mengeringkan material yang relatif basah. Jika proses pada *mill* sudah selesai, maka produk yang sudah halus, akan diteruskan dan disimpan di menara penampungan semen atau silo. *Vertical mill* mempunyai 4 fungsi utama, yaitu: penggilingan, pengeringan, pemisahan, dan transportasi (Hema, 2020).



Optimized using
trial version
www.balesio.com



Gambar 3 Klasifikasi bagian pada *vertical mill* berdasarkan proses
(Sumber: <https://jeksinhema12.wordpress.com/2020/10/12/pengenalan-industri-semen-vertical-roller-mill/>)

2.3 Motor Induksi

Motor induksi merupakan salah satu mesin listrik dinamis arus bolak balik (*alternating current*) yang paling banyak dan luas penggunaannya. Penamaan motor induksi diambil sesuai kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya. Arus yang dihasilkan rotor (bagian yang bergerak) pada motor ini bukan diperoleh dari sumber listrik tertentu, melainkan arus yang terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar atau *rotating magnetic field* (RMF) yang dihasilkan oleh arus stator (Anthony, 2019).

Pada aplikasinya dalam dunia industri dan pertambangan, motor induksi 3 fasa merupakan jenis motor induksi yang digunakan sebagai penggerak utama bagi Sebagian besar mesin (Ghazali, 2011). Adapun kelebihan dari motor induksi yaitu mempunyai konstruksi yang sederhana, relatif lebih murah harganya bila

dikurangkan dengan jenis motor yang lain, menghasilkan putaran yang konstan, perawatan yang mudah, pada pengasutannya tidak memerlukan motor lain sebagai penggerak mula, dan juga tidak memerlukan sikat-sikat sehingga rugi gesekan bisa



dikurangi. Namun dibalik kelebihanannya, motor induksi juga memiliki beberapa kekurangan yaitu putarannya sulit diatur, dan arus pengasutan yang cukup tinggi sekitar 4 sampai 8 kali dari arus nominal motor (Sumardjati et al, 2008). Terlepas dari kekurangannya, sampai saat ini motor induksi masih relevan untuk digunakan dalam beberapa bidang seperti industri dan pertambangan. Di beberapa negara modern, lebih dari setengah total energi listrik yang digunakan diubah menjadi energi mekanik menggunakan motor induksi AC 3 fasa (Ghazali, 2011).

2.3.1 Klasifikasi motor induksi

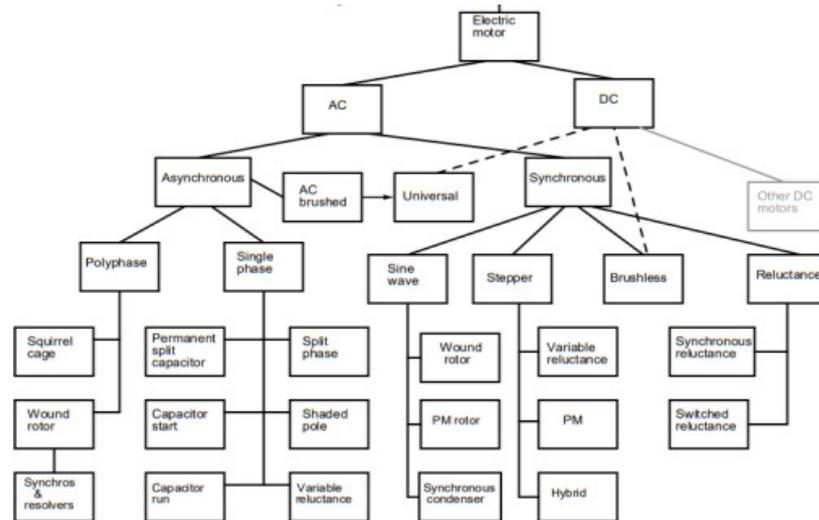
Motor listrik secara umum dapat diklasifikasikan menjadi 2 bagian berdasarkan jenis sumbernya, yaitu motor listrik sumber AC dan sumber DC. Untuk motor induksi, dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok berdasarkan jumlah fasanya yaitu motor induksi satu tiga fasa atau *polyphase*, dan motor induksi satu fasa seperti yang terlihat pada gambar 2.1.

Motor induksi tiga fasa memiliki medan magnet putar atau *rotating magnetic field* (RMF) yang ditimbulkan oleh arus pada stator yang dipasok oleh sumber tiga fasa yang seimbang. Motor induksi tiga fasa memiliki kemampuan daya yang tinggi, dan memiliki jenis rotor berbentuk sangkar tupai dan rotor belitan atau *wound rotor*. Diperkirakan sekitar 70 persen motor listrik di dunia industri menggunakan motor jenis ini sebagai penggerak utama mesin, pompa, kompresor, *grinder*, konveyor (Ghazali, 2011).

Motor induksi satu fasa banyak tersedia dengan daya kurang dari 1 HP. Pengaplikasiannya biasa terdapat pada peralatan rumah tangga sederhana, seperti kipas angin, motor pompa, dan lain-lain. Apabila membutuhkan daya motor induksi satu fasa yang lebih besar, maka akan membutuhkan biaya yang lebih mahal karena konstruksi dari motor induksi satu fasa ini sedikit lebih rumit dari motor induksi tiga fasa untuk daya yang lebih besar. Oleh karena itu, disarankan untuk menggunakan motor induksi tiga fasa untuk keperluan daya yang besar. Motor jenis ini dikelompokkan lagi berdasarkan cara kerjanya, yaitu motor fasa



lit phase), motor kutub bayangan (*shaded pole*), motor reluktansi variabel (*reluctance*) dan motor kapasitor yang terdiri dari motor kapasitor start, pasitor run, dan motor kapasitor *start-run* (Anthony, 2019).

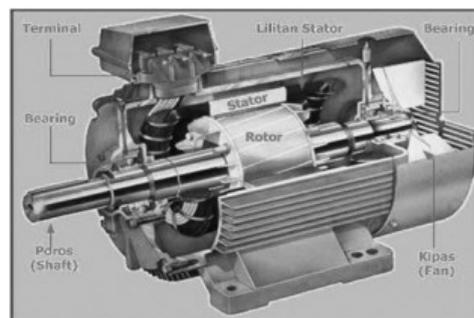


Gambar 4 Klasifikasi motor listrik

(Sumber: Kuphaldt, 2021)

2.3.2 Konstruksi motor induksi

Pada dasarnya, motor induksi memiliki dua komponen utama yaitu stator merupakan bagian yang diam, dan rotor merupakan bagian yang bergerak. Antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara yaitu tempat melintasnya fluks magnetik yang dihasilkan oleh kumparan stator yang dialiri arus listrik.

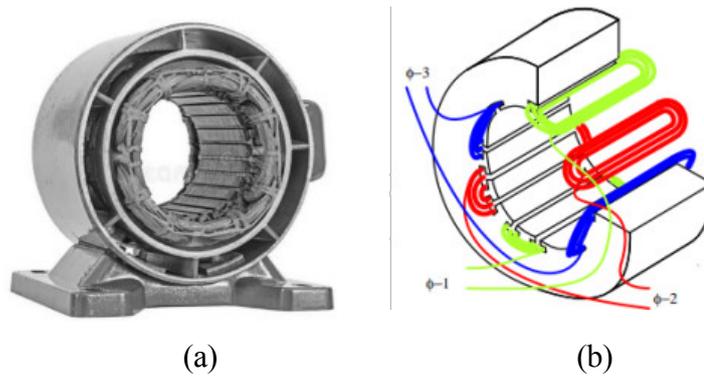


Gambar 5 Konstruksi motor induksi

(Sumber: Sumardjati et al, 2008)

- a. Stator, merupakan bagian yang diam pada motor dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnet kepada kumparan rotornya. Stator pada dasarnya terdiri dari beberapa bagian yaitu, rumah stator (rangka stator), inti stator, alur dan belitan atau kumparan stator (Anthony, 2019).

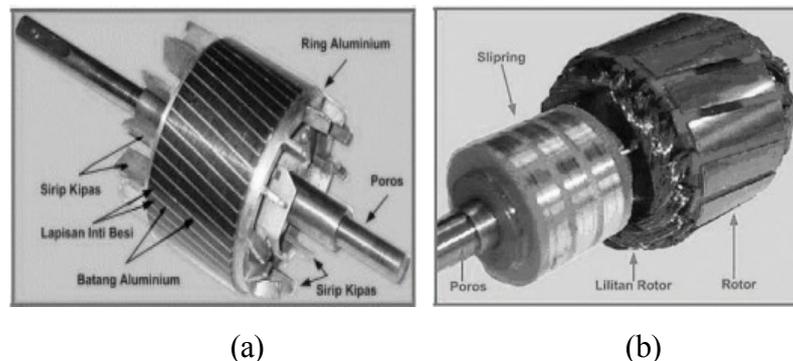




Gambar 6 Stator (a), konstruksi lilitan 3 fasa pada stator (b)

(sumber: <https://www.dreamstime.com/stator-electric-motor-isolated-white-background-image134245195> (a), Kuphaldt, 2021 (b))

- b. Rotor, merupakan bagian yang bergerak pada motor yang diakibatkan karena adanya induksi magnet dari kumparan stator. Rotor terdiri dari beberapa bagian yaitu inti rotor, alur, belitan, dan poros atau biasa disebut *shaft* rotor. Berdasarkan konstruksinya, rotor dibagi menjadi dua jenis yaitu rotor sangkar tupai (*squirrel cage*) dan rotor belitan (*wound*).



Gambar 7 Rotor sangkar tupai (a), rotor belitan (b)

(Sumber: Sumardjati et al, 2008)

2.3.3 Prinsip kerja motor induksi

Motor induksi bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dari kumparan stator ke kumparan rotor. Apabila suatu motor induksi tiga fasa dihubungkan dengan sumber tiga fasa itu sendiri, maka kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar atau biasa disebut dengan medan putar *ting magnetic field* (RMF). Fluks yang ditimbulkan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotornya, sehingga timbul gaya gerak listrik *tromotive force* (EMF). Dikarenakan kumparan rotor merupakan suatu

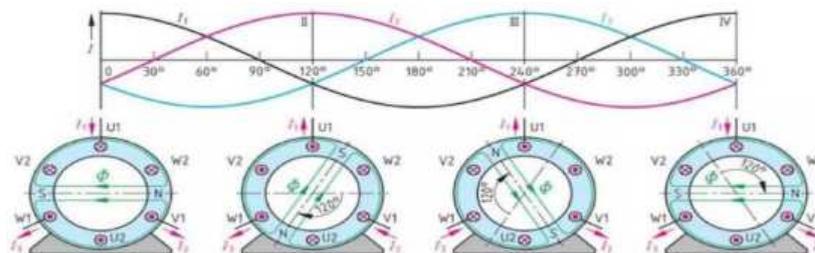


rangkaian tertutup, maka akan mengalir arus pada kumparan rotor tersebut. Kumparan rotor yang dialiri arus listrik dan berada dalam garis fluks yang berasal dari kumparan stator, maka pada kumparan rotor akan mengalami gaya Lorentz yang menimbulkan torsi, sehingga rotor berputar mengikuti arah pergerakan medan putar stator.

Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban pada motor, akan memperbesar kopel motor sehingga slipnya juga semakin besar. Hal tersebut mengakibatkan arus induksi pada rotor juga semakin besar. Jadi, apabila beban motor bertambah, putaran rotor pun cenderung menurun (Anthony, 2019).

2.3.4 Medan putar

Putaran motor pada mesin listrik arus bolak balik terjadi karena adanya medan putar yang ditimbulkan oleh kumparan stator yang dialiri arus listrik bolak balik. Medan putar tersebut timbul jika stator dihubungkan oleh sumber tiga fasa yang dapat berupa hubungan belitan bintang atau segitiga (Sumardjati et al, 2008). Gambar dibawah ini menjelaskan bagaimana bentuk gelombang sinusoidal yang ditimbulkan oleh motor induksi fasa, serta bagaimana medan putar timbul.



Gambar 8 Bentuk gelombang sinusoidal dan timbulnya medan putar pada stator motor induksi
(Sumber: Siswoyo, 2008)

1. Saat sudut 0° , arus I_1 bernilai positif dan arus I_2 dan arus I_3 bernilai negatif. Dalam hal ini belitan V_2 , U_1 dan W_2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan belitan V_1 , U_2 dan W_1 bertanda titik (arus listrik menuju pembaca). Maka timbul fluks magnet pada garis horizontal sudut 0° . kutub (south = selatan) dan kutub N (north = utara).
 Saat sudut 120° , arus I_2 bernilai positif sedangkan arus I_1 dan arus I_3



bernilai negatif. Dalam hal ini belitan W2, V1 dan U2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan belitan W1, V2 dan U1 bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluks magnet yang timbul kutub S dan N bergeser 120° dari posisi awal.

3. Saat sudut 240°, arus I3 bernilai positif dan I1 dan I2 bernilai negatif. Dalam hal ini, belitan U2, W1 dan V2 bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan belitan U1, W2 dan V1 bertanda titik (arus menuju pembaca). Maka garis fluks magnet kutub S dan N bergeser 120° dari posisi kedua.
4. Saat sudut 360°, posisi ini sama halnya dengan pada saat sudut 0°, dimana kutub S dan N kembali keposisi awal.

Dari keempat kondisi diatas saat sudut 0°, 120°, 240°, 360°, dapat dijelaskan terbentuknya medan putar pada stator, medan magnet putar stator akan memotong belitan rotor. Kecepatan medan putar stator ini sering disebut kecepatan sinkron atau biasa juga disebut *rotating magnetic field* (RMF), tidak dapat diamati dengan alat ukur tetapi dapat dihitung secara teoritis berdasarkan persamaan berikut (Siswoyo, 2008):

$$n_s = \frac{120 \times f}{p} \text{ rpm} \quad (1)$$

dimana,

n_s = kecepatan putaran sinkron stator (rpm)

f = frekuensi sumber (Hz)

p = jumlah kutub

2.3.5 Slip dan frekuensi rotor pada motor induksi

Putaran rotor pada motor induksi, tidak akan sama dengan putaran medan putar stator. Apabila kecepatan putaran rotor sama dengan putaran medan stator maka tidak akan terdapat perbedaan kecepatan sehingga tidak ada gaya gerak listrik induksi pada rotor, tidak ada arus rotor, dan tidak ada kopel yang mendorong rotor.

Oleh karena itu rotor selalu berputar dibawah kecepatan medan putar stator. Slip menunjukkan kecepatan relatif rotor terhadap medan putar, dimana:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2)$$



dimana,

N_s = kecepatan sinkron (rpm)

N_r = kecepatan rotor (rpm)

Kemudian slip (S) merupakan perbandingan slip mutlak terhadap N_s , ditunjukkan oleh hubungan persamaan berikut:

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad (3)$$

Dalam keadaan diam, frekuensi rotor (f_2) sama besarnya dengan frekuensi sumber tegangannya atau frekuensi pada stator (f_1). Namun bila rotor berputar, besar frekuensi rotor bergantung pada besarnya kecepatan relatif atau slip mutlak. Hubungan frekuensi dengan slip dapat dituliskan dengan persamaan berikut (Sumardjati et al, 2008):

$$N_s = \frac{120 \times f}{p}, \quad (4)$$

$$f_1 = \frac{p \times N_s}{120}, \quad (5)$$

dan pada rotor berlaku hubungan,

$$\frac{f_2}{f_1} = S. \quad (6)$$

2.3.6 Torsi pada motor induksi

Torsi merupakan gaya putar atau kemampuan motor untuk menggerakkan beban mekaniknya. Torsi juga berhubungan dengan interaksi antara medan magnetik stator dan rotor pada motor induksi. Torsi ini muncul karena adanya arus induksi yang dihasilkan oleh perubahan medan magnetik stator. Ada beberapa faktor yang dapat memengaruhi nilai dari torsi itu sendiri, antara lain kecepatan putaran motor, daya yang dihasilkan dan juga besarnya beban mekanik yang akan diputar oleh rotor. Hubungan antara torsi dengan daya yaitu berbanding lurus, dimana semakin besar daya, maka torsi yang dihasilkan juga akan semakin besar. Namun torsi berbanding terbalik dengan kecepatan putaran rotor atau kecepatan sudut. Hubungan tersebut dapat dilihat pada persamaan dibawah ini.

$$P = T \times \omega \quad (7)$$



: Daya (Watt)

: Torsi (Nm)

ω = Kecepatan sudut (rps)

Selain daya dan kecepatan sudut, pembebanan pada rotor juga memengaruhi nilai dari torsi itu sendiri. Semakin besar beban mekanik yang ditanggung oleh rotor, maka semakin besar pula torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan beban tersebut. Sebaliknya, jika beban mekanik semakin kecil, maka torsi yang dibutuhkan juga semakin kecil. Persamaan untuk menghitung torsi sebagai berikut.

$$T = \frac{5252 \times P}{n} \quad (8)$$

dimana,

T = Torsi motor (lb ft)

P = Daya motor (HP atau Horse Power)

n = Kecepatan putar motor (rpm)

5252 = Konstanta

(1 kW = 1,341 HP, dan 1 lb ft = 1,355 Nm.)

2.3.7 Spesifikasi motor *main drive*

Motor *main drive* merupakan sebuah motor induksi 3 fasa rotor belitan yang menjadi penggerak utama dari mesin *mill* atau mesin penggiling semen pada unit *finish mill*. Adapun data-data mengenai spesifikasi secara detail dari motor *main drive* pada *finish mill* V PT Semen Tonasa yaitu sebagai berikut :

Tabel 1 Spesifikasi motor *main drive*

Merek/Type	ABB/AML710L6ABiM
Daya	5.500 kW
Tegangan	6.000 V
Frekuensi	50 Hz
Arus	643 A
Putaran	994 rpm
Jumlah kutub	6
CI	F
Parameter rotor	
Resistansi	0,29 Ω
Reaktansi	0,627 Ω
Tegangan	2.008 V
Arus	1.653 A



Parameter stator	
Resistansi	0,12 Ω
Reaktansi	3,194 Ω
Faktor daya	0,86
Massa	18.850 kg



Gambar 9 Motor *main drive*
(Sumber : PT Semen Tonasa)

2.4 Pengasutan Motor Induksi

Karakteristik dari motor induksi yaitu ketika *distarting* secara langsung, arus awal motor besarnya antara 500 sampai dengan 700 persen dari arus nominalnya. Hal ini akan mengakibatkan drop tegangan yang besar pada pasokan tegangan PLN. Namun untuk motor induksi dengan daya kecil sampai 5 kilowatt (kW), arus *starting* tidak berpengaruh besar terhadap drop tegangan. Namun pada motor dengan daya diatas 30 kilowatt (kW) akan menyebabkan *drop* tegangan yang besar mengakibatkan menurunnya kualitas listrik.



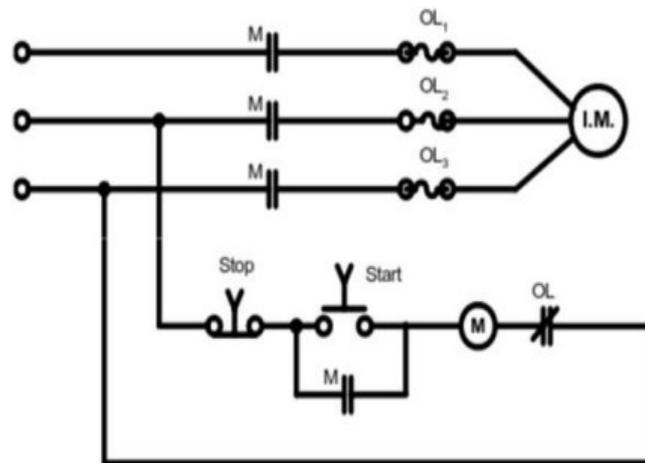
Pengasutan motor induksi merupakan cara menjalankan pertama kali motor ini, dengan tujuan agar arus startingnya kecil dan juga drop tegangan masih di atas toleransi. Secara umum, ada beberapa macam metode pengasutan

antara lain yaitu metode *start* secara langsung DOL (*Direct On Line*), *wye-delta*, *primary resistor*, *autotrafo*, *soft starter*, VFD (*Variable Frequency Drive*), dan *start* dengan *slip ring* atau tahanan luar (Siswoyo, 2008).

2.4.1 *Direct on line* (DOL)

Pengasutan *direct on line* atau biasa disebut pengasutan hubungan langsung, disarankan untuk digunakan pada motor induksi berdaya kecil hingga 5 kW. Saat rangkaian DOL dijalankan, motor induksi akan menarik arus starting antara 5 sampai 6 kali arus nominal motor. Jenis rangkaian *starting* ini biasanya dipakai untuk motor-motor penggerak mekanik seperti mesin bubut, mesin bor, dan lain-lain (Siswoyo, 2008).

Metode ini menyebabkan efisiensi energi motor rendah karena lonjakan arus awalnya yang tinggi. Namun, untuk instalasi metode pengasutan ini tidak memerlukan biaya yang tinggi, karena tidak memerlukan peralatan kontrol tambahan.



Gambar 10 Rangkaian pengasutan langsung (DOL) pada motor induksi
(Sumber: Ali, 2015)

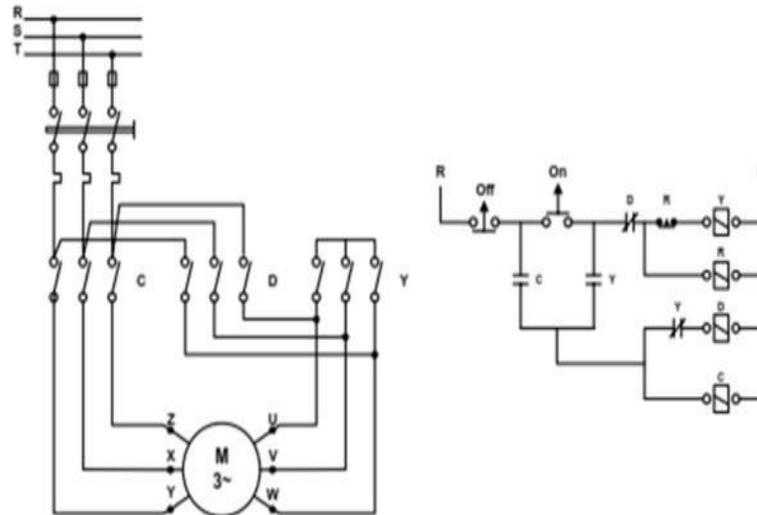
2.4.2 Wye-Delta

Pada pengasutan wye-delta, motor mula-mula dihubungkan secara wye. Setelah mencapai putaran kecepatan penuhnya lalu koneksi motor dihubungkan delta. Hubungan wye yaitu sebesar $\frac{1}{3}$ kali arus hubungan delta. Kelebihan pengasutan wye-delta yaitu karakteristik kecepatan arus, torsi yang baik, untuk berbagai jenis motor. Adapun kelemahannya yaitu motor harus



memiliki 6 terminal kumparan, umumnya hanya cocok untuk beban yang memiliki torsi rendah, ada saat transisi dari hubungan wye ke delta, menghasilkan arus transien (Ali, 2015).

Pada metode pengasutan ini, efisiensi energi pada motor sedang, tergantung pada kecepatan dan beban motor. Dibutuhkan juga biaya instalasi tambahan untuk peralatan kontrol untuk mengubah hubungan wye-delta.



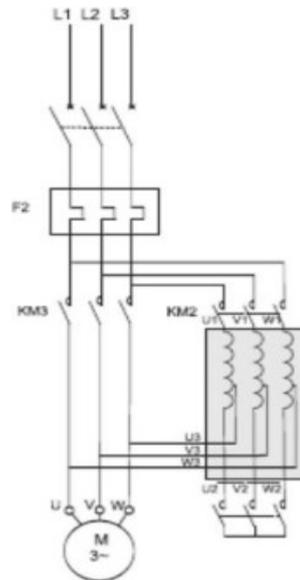
Gambar 11 Rangkaian pengasutan wye-delta pada motor induksi
(Sumber: Ali, 2015)

2.4.3 Autotrafo

Jenis pengasutan ini yaitu motor dihubungkan dengan sebuah *autotrafo* atau transformator otomatis tiga fasa yang memiliki banyak *tapping*. Untuk memindahkan *tapping autotrafo* digunakan *starting contactor* dan waktu pemindahannya diatur menggunakan *timer*. Kelebihan dari metode pengasutan *autotrafo* yaitu pengatur (tap) transformator dapat dilakukan untuk batasan beban yang luas, karakteristik torsi terhadap arus memiliki nilai yang optimal, dan juga motor tidak diputus-hubungkan dari suplai selama perubahan akibat pengaturan (tap) sehingga mengurangi transient. Adapun kekurangannya yaitu biaya konstruksi yang mahal (Ali, 2015).

Pengasutan *autotrafo* biasanya diaplikasikan pada motor dengan kapasitas ar dengan lonjakan arus awal yang besar. Penginstalan metode *autotrafo* kan sebuah trafo otomatis tiga fasa dengan kapasitas trafo yang aikan kebutuhan motor.





Gambar 12 Rangkaian pengasutan *autotrafo* pada motor induksi

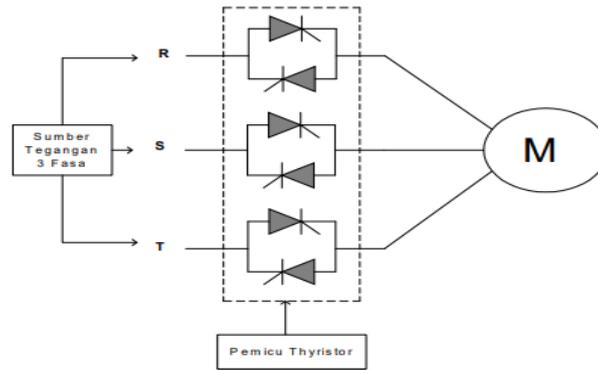
(Sumber: <https://direktorilistrik.blogspot.com/2014/01/Mode-Starting-Motor-Dengan-Autotransformator.html>)

2.4.4 *Soft starter*

Pengasutan dengan metode *soft starter* digunakan untuk mengatur atau memperhalus *start* dari elektrik motor. Cara kerjanya adalah dengan mengatur tegangan yang masuk ke motor. Pertama-tama motor diberikan tegangan yang rendah, sehingga arus dan torsi pun juga akan rendah. Pada level ini motor hanya bergerak perlahan dan tidak menimbulkan kejutan pada putarannya. Selanjutnya tegangan akan dinaikan secara bertahap sampai ke nominal tegangan dari motor itu sendiri. Motor kemudian akan berputar dengan kondisi RPM yang nominal. Metode ini biasanya diaplikasikan pada motor yang memiliki kapasitas besar dengan pengasutan awal yang besar pula. Efisiensi energi yang dihasilkan tinggi, karena penurunan tegangan yang sangat kecil atau bahkan tidak ada saat pengasutan.

Komponen utama *soft starter* adalah *thyristor* dan rangkaian yang mengatur trigger thyristor. Seperti diketahui, *output thyristor* dapat diatur melalui pin *gate* rangkaian tersebut akan mengontrol level tegangan yang akan dikeluarkan *istor* (Priahutama et al, 2010).





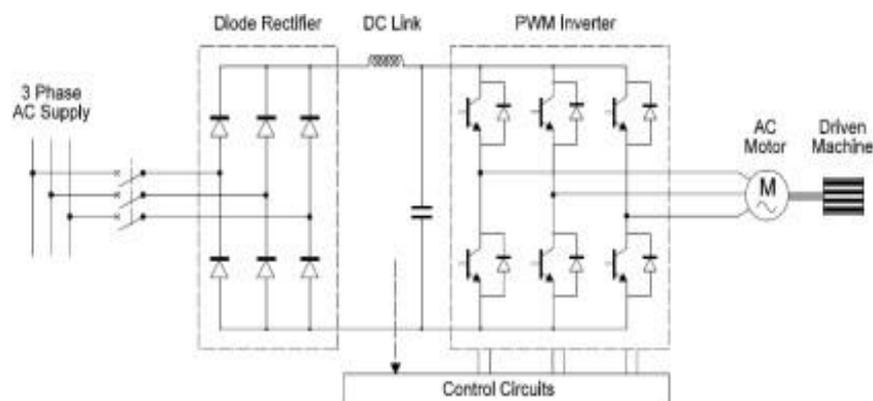
Gambar 13 Rangkaian pengasutan *soft starter* pada motor induksi

(Sumber: Riyadi, 2011)

2.4.5 Variable frequency drive (VFD)

Variable frequency drive atau *variable speed drive* adalah suatu alat yang digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor listrik (AC) dengan mengontrol frekuensi daya listrik yang dipasok ke motor. Bentuk rangkaian dari *variable speed drive* (VSD) terdiri dari beberapa bagian seperti *rectifier*, *DC link*, dan *Inverter*. Arus AC yang masuk ke VFD akan disearahkan menjadi arus DC, kemudian frekuensinya dicacah dan dimodulasi agar sesuai dengan frekuensi yang diinginkan. Setelah itu arus DC kembali diubah menjadi arus AC sebelum masuk ke motor (Atmam et al, 2018).

Metode ini diaplikasikan pada motor induksi yang memerlukan pengaturan kecepatan sesuai dengan kebutuhannya. Biaya penginstalan metode bisa terbilang tinggi jika dibandingkan dengan metode lain karena membutuhkan sebuah perangkat VFD.



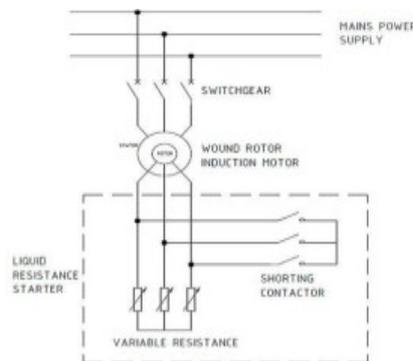
bar 14 Rangkaian pengasutan *variable frequency drive* pada motor induksi

(sumber: Atmam et al, 2018)



2.4.6 Tahanan luar atau tahanan rotor

Pengasutan dengan tahanan luar digunakan hanya untuk motor induksi jenis rotor lilit yang dilengkapi *slip ring* pada rotornya sebagai penghubung dengan tahanan luar. Motor rotor lilit dirancang untuk daya besar. Pengasutan motor rotor lilit pada belitan rotornya dihubungkan dengan resistor luar yang nilainya bisa diatur. Dengan mengatur resistansi rotor, arus rotor dapat diatur. Ketika resistansi bernilai maksimum, maka arus rotor yang mengalir minimum. Sebaliknya, jika resistansi bernilai minimum maka arus rotor yang mengalir bernilai maksimum. Kelebihan dari pengasutan tahanan luar yaitu torsi asut bernilai tinggi dengan nilai arus yang terkendali. Nilai arus asut kira-kira 200 persen dari nominalnya. Pengaturan tahanan luar bisa menggunakan rangkaian kontaktor elektromagnetik dan resistor, bisa juga menggunakan media cair sebagai resistor yang dikenal dengan *liquid rotor starter* (LRS) (Siswoyo, 2008).



Gambar 15 Rangkaian pengasutan tahanan luar pada motor induksi
(Sumber: <https://www.pthglobal.com.au/what-is-a-liquid-resistance-starter>)

2.5 *Liquid Rotor Starter* (LRS)

Liquid Rotor Starters juga dikenal sebagai *liquid resistance starter* atau *electrolytic starters* merupakan suatu alat yang digunakan sebagai tahanan luar untuk motor induksi rotor belitan yang berfungsi untuk memberikan nilai resistansi pada rotor saat motor pertama kali dinyalakan. *Liquid rotor starter* memiliki dua elektroda terendam pada tiap fasa. Elektroda bagian atas dapat bergerak secara horizontal menuju atau menjauh dari elektroda yang dipasang di bagian bawah tangki. Resistansi bervariasi tergantung jarak antara elektroda bergerak dan elektroda tetap. Nilai resistansi maksimum (R_{max}) ketika elektroda yang bergerak berada di bagian paling atas dan bernilai minimum ketika berada di bagian paling



bawah atau bersentuhan dengan elektroda tetap (R_{min}). Nilai resistansi juga tergantung pada nilai konduktivitas dan suhu elektrolit.

Tegangan rotor pada motor rotor belitan juga dikenal sebagai tegangan sekunder, dimana nilai tertingginya yaitu ketika motor berhenti (yaitu slip pada nilai tertinggi, slip = 1). Elektroda yang bergerak dari *liquid rotor starter* disimpan di bagian atas agar nilai resistansi maksimal pada awal proses pengasutan dengan tujuan membatasi arus rotor yang melonjak. Motor akan mulai menghasilkan torsi saat arus mulai mengalir pada rotor. Saat motor meningkatkan kecepatan, slip berkurang dan tegangan rotor juga berkurang.

Liquid rotor starter diprogram untuk menggerakkan elektroda ke bawah pada saat motor berakselerasi untuk mengurangi resistansi dengan nilai yang kira-kira sebanding dengan pengurangan tegangan sekunder. Ini akan memungkinkan motor mempertahankan arus rotor relatif konstan selama akselerasi motor (Pulsetech, 2022).

Berhubungan karena motor *main drive* merupakan motor induksi 3 fasa jenis rotor belitan atau *wound rotor*, metode pengasutan yang digunakan yaitu metode tahanan luar. Dalam hal ini, tahanan luar yang digunakan yaitu menggunakan media cair sebagai pemberi nilai tahanan pada rotor atau dikenal sebagai *liquid rotor starter*. Elektrolit atau larutan isi dari *liquid rotor starter* yang digunakan adalah larutan natrium karbonat jenis FA 102 (Na_2CO_3) dengan konsentrasi berkisar 0,2-0,3 persen sesuai dengan berat cairan. Untuk meracik serta memberi pengaturan nilai resistansi dari larutan *liquid rotor starter* sesuai dengan yang diinginkan, ada beberapa tahapan yang harus dilakukan yaitu sebagai berikut :

1. Isi tangki dengan air murni atau air suling hingga sesuai tanda yang ada. Sebagai langkah awal, larutkan 21,6 kg bubuk Na_2CO_3 dalam air panas. Jika sudah larut sempurna, kemudian masukkan ke dalam tangki sambil diaduk sampai merata sempurna. Hal penting yang harus diperhatikan yaitu jangan pernah menambahkan Na_2CO_3 dalam keadaan belum larut.
2. Mengukur arus start stator : Pada setengah beban yaitu 0,5 x arus nominal; beban penuh 1-1,2 x arus nominal; pada beban sangat berat 1,5-1,8 x arus nominal.



2.5.1. Prinsip kerja *liquid rotor starter*

Saat motor pertama kali dinyalakan, arus awal sangat tinggi dan motor tidak dapat dinyalakan secara langsung. Menambahkan nilai resistansi pada rotor memungkinkan untuk mengubah karakteristik arus, torsi dan kecepatan motor sehingga mengurangi dampak arus awal yang sangat tinggi.

Sebelum motor dinyalakan, posisi antara masing-masing pasangan elektroda berada pada jarak yang paling jauh, dalam artian elektroda yang bagian atas berada pada titik puncaknya. Kemudian saat motor mulai dinyalakan, tiga elektroda pada masing-masing fasa bergerak turun menuju elektroda yang diam. Pergerakan elektroda diatur sedemikian rupa agar menghasilkan variasi resistansi yang dibutuhkan (AOIP, n.d).

2.5.2. Bagian-bagian pada *liquid rotor starter*

Secara umum *liquid rotor starter* terdiri dari beberapa komponen penyusun antara lain yaitu:

1. Tangki

Tangki merupakan bak yang dimana elektrolit ditempatkan, terbuat dari plat baja dan tahan terhadap korosi.

2. Elektroda

Elektroda terdiri dari tiga pasang yang dimana terdapat tiga elektroda bagian atas yang dapat bergerak naik dan turun, dan tiga lainnya terletak di bawah dengan posisi tetap. Elektroda terbuat dari bahan karbon rendah dengan tebal kira-kira tiga milimeter (3 mm) dengan bentuk cincin silinder. Elektroda yang bergerak, dihubungkan secara bintang menggunakan batang tembaga.

3. Motor penggerak

Motor penggerak berfungsi untuk menggerakkan elektroda bagian atas secara vertikal, agar memberikan nilai tahanan sesuai yang dibutuhkan.

4. Kontakor hubung singkat

ontaktor hubung singkat berfungsi untuk menghubungkan singkatkan hanaan luar saat posisi elektroda berada pada nilai R_{min} , atau saat tahanan ar sudah tidak dibutuhkan lagi untuk proses *start*.



5. Elektrolit

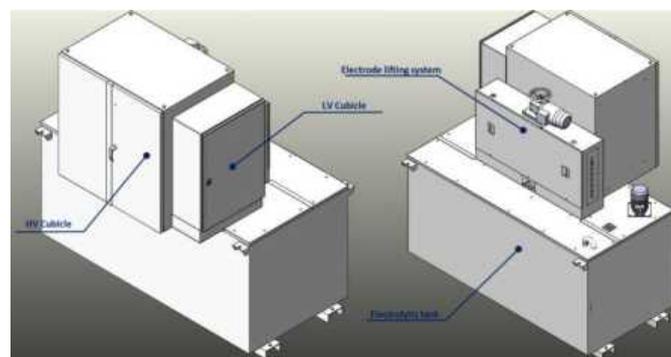
Cairan elektrolit yang ada di dalam tangki berfungsi untuk memberikan nilai resistansi pada rotor saat proses pengasutan. Elektrolit biasa dicampur dengan air untuk memberikan nilai resistansi sesuai dengan yang dibutuhkan. Namun cairan elektrolit juga bersifat dapat menghantarkan arus listrik.

6. Kotak panel

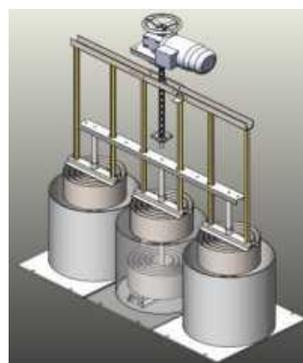
Terdapat dua kotak panel pada *liquid rotor starter*, yaitu kotak panel untuk sambungan kabel fasa antara rotor dengan *liquid rotor starter*, dan kotak panel untuk rangkaian kontrolnya.

7. Komponen tambahan

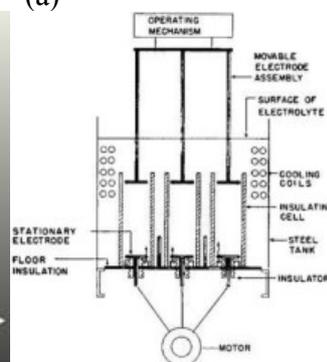
Terdapat beberapa sistem atau komponen tambahan antara lain yaitu sistem pendingin, sistem proteksi, level monitoring, pemutus temperatur lebih, pengukur temperatur elektrolit, dan lain-lain.



(a)



(b)



(c)



Gambar 16 Komponen penyusun *liquid rotor starter*

: <https://www.aoip.com/product/electrolytic-starters-for-slipping-motors/epm/>

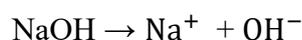
(a) dan (b), Mohammedsaed & Karrar, 2017 (c))

2.5.3. Prinsip elektrokimia pada *liquid rotor starter*

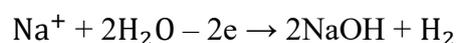
Komponen dasar dari *liquid rotor starter* ini adalah elektrolit dan elektroda. Agar jenis tahanan luar ini dapat digunakan sebagai metode pengasutan, maka elektrolit dan elektroda harus saling berinteraksi sehingga dapat menjadi konduktor untuk menghantarkan arus listrik, sekaligus dapat memberikan nilai resistansi yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan. Pada larutan elektrolit, terjadi proses elektrokimia, atau interkonversi antara energi kimia dengan energi listrik.

Elektrokimia merupakan ilmu kimia yang mempelajari perpindahan elektron pada sebuah media penghantar (elektroda). Proses perpindahan elektron dari elektroda satu ke elektroda yang lainnya membutuhkan media penghantar. Larutan adalah salah satu media yang dapat menjadi media perpindahan elektron. Elektrokimia terbagi menjadi dua, yaitu sel volta dan sel elektrolisis. Sel volta adalah reaksi kimia yang menghasilkan listrik, dan sel elektrolisis adalah reaksi kimia karena adanya energi listrik dari luar.

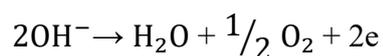
Pada *liquid rotor starter* yang terjadi adalah sel elektrolisis, dimana terjadi reaksi kimia karena adanya pemberian energi listrik yang berasal dari arus rotor. Pada umumnya jenis cairan dari *liquid rotor starter* yaitu Na_2CO_3 dan air. Reaksi kimia yang terjadi sebagai berikut:



Reaksi yang terjadi pada katoda adalah:



Reaksi yang terjadi pada anoda adalah:



Dimana e adalah 1 Faraday. Pada proses reaksi tersebut akan dibebaskan H_2 dan O_2 dan air akan berkurang. Jika jumlah Na_2CO_3 yang digunakan konstan seperti yang terlihat pada reaksi di katoda, dimana NaOH yang dihasilkan didekomposisi atau diuraikan menjadi Na^+ dan OH^- sehingga perlu untuk

menambahkan air ke elektrolit untuk menjaga konsentrasi elektrolitnya.

Dalam proses diatas, ion Na^+ dan OH^- yang dilepaskan tersebutlah yang akan menghantar muatan listrik dari anoda ke katoda. Dengan demikian, dapat



disimpulkan bahwa elektrolit diatas memiliki sifat konduktivitas.

Hukum ohm menjelaskan bahwa arus listrik I (ampere) yang mengalir dalam sebuah konduktor berbanding lurus dengan tegangan V atau gaya gerak listrik E (Volt), dan berbanding terbalik dengan hambatan R (ohm) dari sebuah konduktor.

Hambatan R (ohm), bergantung pada sifat kimia dari bahan konduktor, yang dimana:

$$R = \frac{\rho \times l}{A} \quad (10)$$

dimana,

l = Jarak antar elektroda (m)

ρ = Hambatan jenis larutan (($\Omega.m$))

A = Luas permukaan elektroda (m^2)

Dalam larutan elektrokimia terdapat nilai konduktan (G), dengan satuan Siemens (S), yang dimana nilai konduktan berbanding terbalik dengan hambatan.

$$G = \frac{1}{R} \quad (11)$$

dimana 1 siemens (S) bernilai Ω^{-1} .

Konduktan jenis (konduktivitas), δ didefinisikan sebagai berikut:

$$G = \frac{\delta \times A}{l} \quad (12)$$

$$\text{atau, } R = \frac{l}{\delta \times A} \quad (13)$$

dimana,

R = Resistansi (Ω)

δ = Konduktivitas elektrolit (cm/ Ω)

l = Jarak antar elektroda (cm)

A = Luas permukaan elektroda (cm^2)

Dari persamaan diatas, untuk mengubah-ubah nilai resistansi tahanan luar tiga dapat dilakukan dengan cara :

1. Mengubah-ubah nilai hambatan jenis larutan elektrolit. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah-ubah konsentrasi elektrolit yang digunakan sesuai dengan perbandingan kimianya. Untuk mendapatkan nilai resistansi yang lebih besar, dengan cara menambahkan konsentrasi airnya. Sebaliknya, untuk dapatkan resistansi yang lebih kecil atau nilai konduktansi lebih besar, tambahkan konsentrasi garamnya.



2. Mengubah-ubah jarak antara kedua elektrodanya. Hal ini dilakukan dengan menggerakkan salah satu batang elektroda sehingga jarak antara kedua elektroda akan berubah, semakin besar jarak kedua elektroda, maka semakin besar nilai resistansinya. Begitupun sebaliknya, semakin dekat jarak kedua elektroda, maka semakin kecil nilai resistansinya.

2.5.4. Spesifikasi *liquid rotor starter*

Adapun spesifikasi dari *liquid rotor starter* yang digunakan di *main drive* pada *finish mill V* pada PT Semen Tonasa yaitu sebagai berikut.

Tabel 2 Spesifikasi *liquid rotor starter*

Merek/Type	MKS/AFAP31
Resistansi maksimal	0,50095 Ω
Resistansi minimal	0,0013 Ω
Daya rating	5.500 kW
Arus rotor	1.699 A
Tegangan rotor	1.960 V
Massa larutan	1.200 kg
Tegangan control	220 V
Periode pengasutan	20 detik



Gambar 17 Nameplate *liquid rotor starter*

(Sumber : PT Semen Tonasa)



2.6 *Equipment* Pendukung dan Spesifikasinya

2.6.1 Transformator

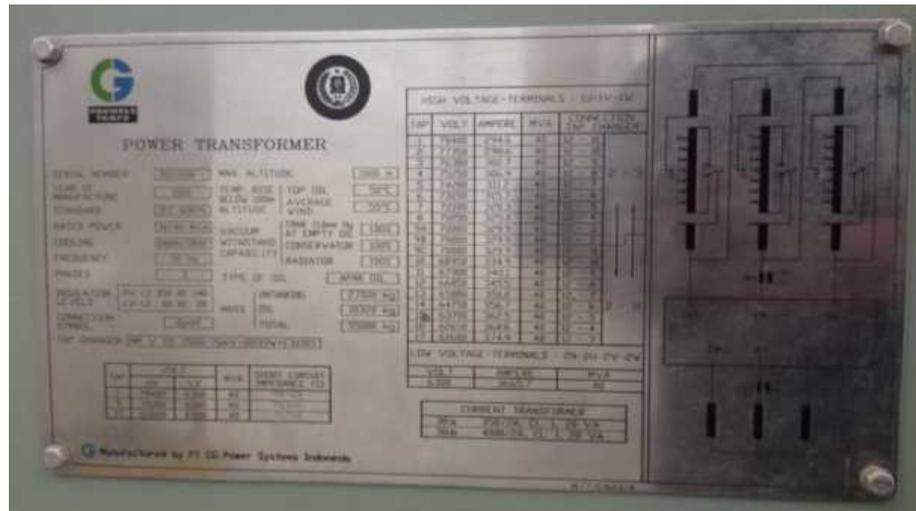
Transformator merupakan salah satu alat Listrik yang sangat banyak digunakan pada bidang tenaga Listrik dan bidang elektronika. Khususnya pada bidang tenaga Listrik, transformator digunakan mulai dari pusat pembangkitan tenaga Listrik sampai ke rumah-rumah. Transformator berfungsi sebagai penaik maupun penurun tegangan yang bekerja pada arus listrik bolak-balik dengan prinsip induksi elektromagnetik.

Untuk memenuhi kebutuhan listrik PT Semen Tonasa, suplai listrik sepenuhnya diambil dari perusahaan listrik negara (PLN). Suplai listrik PLN melalui sistem interkoneksi dari saluran transmisi 70 kV diturunkan menjadi 6 kV pada *main sub station* PT Semen Tonasa unit V. Untuk suplai listrik motor *main drive*, di suplai langsung dari keluaran transformator *main sub station* Tonasa V. Adapun spesifikasi dari transformator tersebut yaitu sebagai berikut.

Tabel 3 Spesifikasi transformator

Merek	CG Pauwels Trafo
Daya rating	40/50 MVA
Frekuensi	50 Hz
Jumlah Fasa	3
Pendingin	ONAN/ONAF
Vektor grup	Dyn11
Tegangan primer	70 kV
Tegangan sekunder	6,3 kV
Tipe minyak	APAR oil
Temperatur minyak	50°C
Massa total	55.000 kg





Gambar 18 Nameplate transformator

(Sumber : PT Semen Tonasa)

2.6.2 Switchgear

Pemasokan tenaga listrik harus terjamin keamanannya, baik untuk peralatan itu sendiri maupun keamanan terhadap manusia. Pada pabrik semen PT Semen Tonasa, digunakan sebuah komponen pengaman yaitu *switchgear*. *Switchgear* ini merupakan sebuah perangkat kelistrikan berupa panel yang digunakan sebagai alat kontrol (menghubungkan/memutuskan distribusi listrik), alat proteksi (melindungi perangkat listrik lain ketika ada gangguan) dan sebagai alat pengukuran besaran listrik (arus, tegangan, daya dll). *Switchgear* untuk motor *main drive* pada *finish mill V* diletakkan dalam sebuah ruangan untuk mengontrol pendistribusian listrik ke motor *main drive* itu sendiri. Adapun spesifikasi dari *switchgear* untuk motor *main drive finish mill V* yaitu sebagai berikut.

Tabel 4 Spesifikasi *switchgear*

Merek/Type	Siemens/Simoprime World
Tegangan operasi	6,3 kV
Arus primer nominal	1.250 A
Kapasitas arus hubung singkat	31,5 kA
Frekuensi	50 Hz
Temperatur	40° C





SIEMENS			
Type : SIMOPRIME WORLD		Year of manufacture : 2011	
Serial - no. : T7-B2-000137/005		Functional unit no. : L203/L05	
$I_n = 3150 \text{ A}$	IEC 62271-200 (IEC 60298)	LSC 2B-PM	
$I_s = 1250 \text{ A}$	$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$	$f_n = 50 \text{ Hz}$	
$U_n = 6.3 \text{ kV}$	$U_p = 60 \text{ kV}$	$U_s = 20 \text{ kV}$	
$I_b = 31.5 \text{ kA}$	$I_p = 78.75 \text{ kA}$	$t_b = 1 \text{ s}$	
$U_s = 110 \text{ VDC}$	IAC FLR as per IEC 62271-200		
accessibility type A test current 25 kA 1s			
Instruction Book reference : 880-3038.9			
Rating of installed components must also be considered !			
MADE IN INDONESIA			

Gambar 19 Switchgear

(Sumber : PT Semen Tonasa)

Switchgear adalah salah satu perangkat penting dalam sistem kelistrikan karena menjalankan 4 fungsi sekaligus yaitu fungsi *switching* (melalui *circuit breaker*, *disconnecting switch*, dll), fungsi pengukuran (melalui berbagai alat pengukuran besaran listrik seperti arus, tegangan, daya, frekuensi, faktor daya, dll), fungsi monitoring (melalui fasilitas monitoring status operasi seperti kondisi *short circuit*, *over current*, *not ready*, *fault*, dll, serta bisa untuk remote control melalui PLC/DCS/SCADA), dan juga fungsi proteksi (melalui relay beban seperti *over current*, *over/under voltage*, *overload*, dll). Untuk



beberapa detail dari pengaturan sistem proteksi pada motor *main drive* yaitu sebagai berikut :

1. *Over current protection*

<i>CT rated primary current</i>	: 1.250 A
<i>CT rated secondary current</i>	: 1 A
<i>I>>> pickup</i>	: 00 A
<i>T I>>> time delay</i>	: 0,00 sec
<i>I>> pickup</i>	: 4.125 A
<i>T I>> time delay</i>	: 0,10 sec
<i>I> pickup</i>	: 638 A
<i>T I> time delay</i>	: 10,00 sec
<i>I_p pickup</i>	: 750 A
<i>T I_p time dial</i>	: 3,20 sec
<i>IE>>> pickup</i>	: 00 A
<i>T IE>>> time delay</i>	: 0,00 sec
<i>IE>> pickup</i>	: 250 A
<i>T IE>> time delay</i>	: 0,10 sec
<i>IE> pickup</i>	: 00 A
<i>T IE> time delay</i>	: 10,00 sec
<i>IE_p pickup</i>	: 125 A
<i>T I_e_p time dial</i>	: 0,15 sec

2. *Over & under voltage protection*

<i>U< pickup</i>	: 3,2 kV
<i>T U< time delay</i>	: 10,00 sec.
<i>U<< pickup</i>	: 3,0 kV
<i>T U<< time delay</i>	: 3,00 sec.
<i>Dropout ratio U<</i>	: 1,20
<i>Dropout ratio U<<</i>	: 1,20



<i>pickup</i>	: 6,6 kV
<i>time delay</i>	: 10,00 sec.
<i>pickup</i>	: 6,9 kV

<i>T U>> time delay</i>	: 3,00 sec
<i>Dropout ratio U></i>	: 0,95
<i>Dropout ratio U>></i>	: 0,95

3. *Unbalance load protection*

<i>I2> pickup</i>	: 200 A
<i>T I2> time delay</i>	: 3,00 sec
<i>I2>> pickup</i>	: 375 A
<i>T I2>> time delay</i>	: 00 sec

4. *Startup supervision*

<i>Startup current</i>	: 4.188 A
<i>Startup time</i>	: 20,0 sec
<i>Permissible locked rotor time</i>	: 2,0 sec
<i>Max permissible starting time</i>	: 20,0 sec
<i>Min restart inhibit time</i>	: 20,0 min

5. *Thermal overload protection*

<i>K-factor</i>	: 0,80
<i>Time constant</i>	: 1,0 min
<i>Thermal alarm stage</i>	: 90 %
<i>Current overload alarm setpoint</i>	: 600 A
<i>Emergency time</i>	: 100 sec

