

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

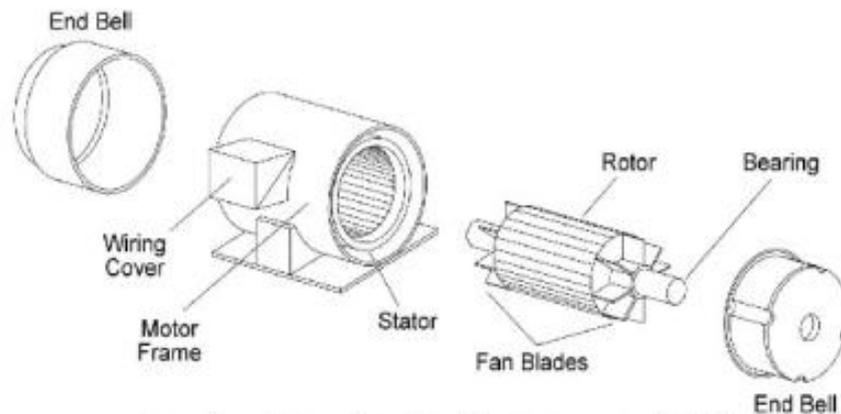
2.1. Motor Induksi Tiga Fasa

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].

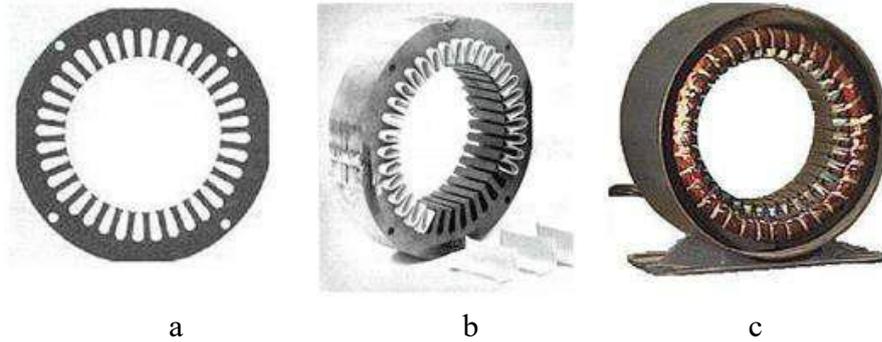


Gambar 2.1 Struktur motor induksi tiga fasa [14].

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 menunjukkan 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*

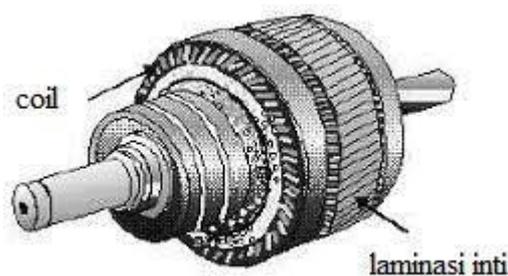
Inti rotor motor induksi sangkar tupai terdiri dari lapisan konduktor yang dipasangkan sejajar dengan poros dan mengelilingi permukaan inti. Konduktor tidak diisolasi dari inti karena arus rotor secara alami akan mengalir ke konduktor rotor dengan resistansi terendah. Di setiap ujung rotor, semua konduktor rotor dihubung 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].



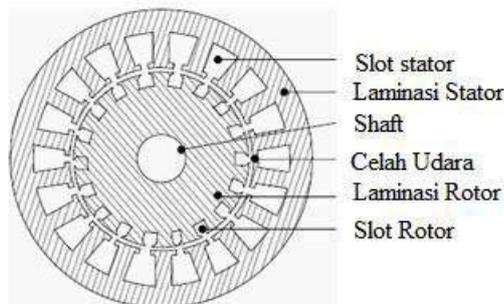
Gambar 2.4 Rotor belitan motor induksi [17].

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*

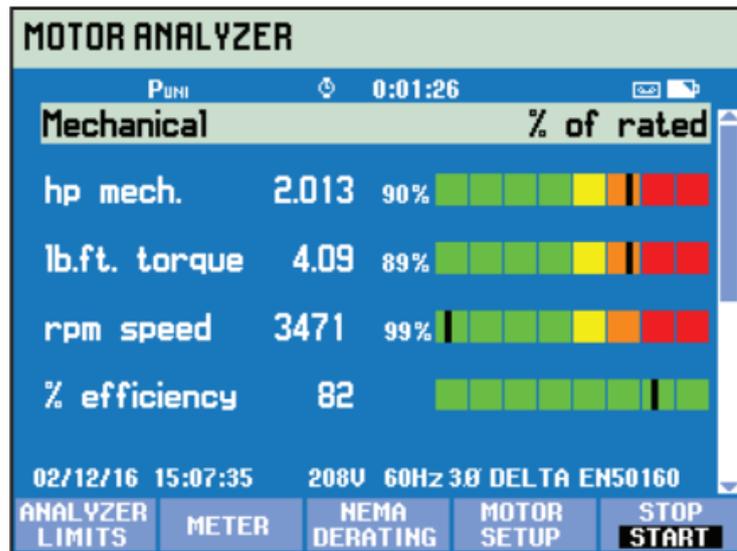
Sebagian kecil dalam motor induksi tiga fasa memiliki bagian kosong di antara stator dan rotor yang disebut celah udara atau *air gap*. Celah udara ini digunakan untuk menyalurkan energi dari stator ke rotor. Pada celah udara ini terdapat gaya magnet yang berasal dari stator yang memutar rotor sesuai 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).

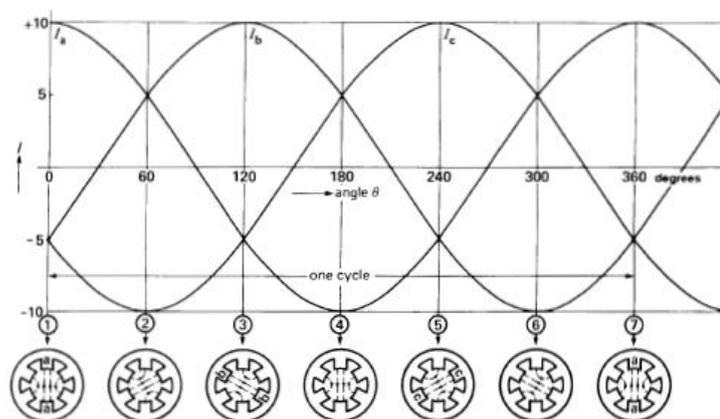
2.3. Prinsip Kerja Motor Induksi

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 diumpangkan 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.

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

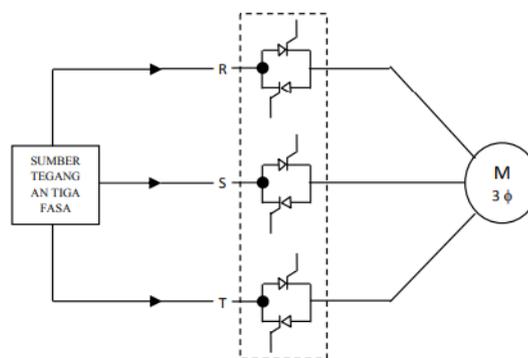
Apabila daya semu sudah didapatkan merujuk pada tabel NEMA maka kita dapat melakukan perhitungan arus *starting* dengan rumus berikut [19].

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

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.

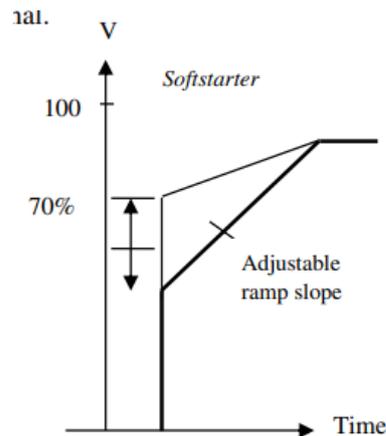
2.6. *Soft Starter*

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].