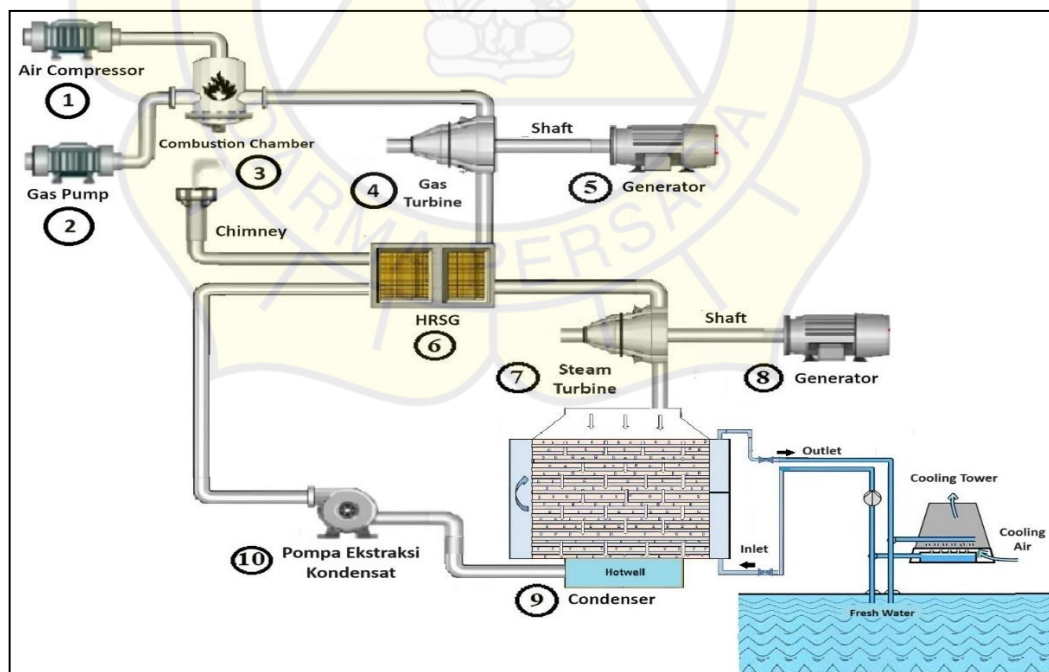


## BAB II

### SISTEM MOTOR POMPA EKSTRAKSI KONDENSAT PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GAS DAN UAP

#### 2.1 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap

PLTGU adalah pembangkit listrik gabungan antara Turbin Gas (PLTG) dan Turbin Uap (PLTU), karena itu pembangkit ini disebut juga Combined Cycle Power Plant. PLTGU merupakan sistem instalasi peralatan yang mengubah energi panas hasil pembakaran bahan bakar gas (CNG/Compressed Natural Gas) atau fuel oil (HSD/High Speed Diesel) menjadi energi listrik. Gas yang dihasilkan dalam ruang bakar pada PLTG akan menggerakkan turbin dan kemudian generator, yang akan mengubahnya menjadi energi listrik. PLTU memanfaatkan energi panas gas buang hasil pembakaran di PLTG dengan temperature sekitar 500 °C untuk memanaskan air di (Heat Recovery Steam Genarator) HRSG sehingga menjadi uap jenuh kering. Uap jenuh kering inilah yang menggerakkan turbin dan kemudian generator di PLTU yang akan mengubahnya menjadi energi listrik. (Muslim et al., 2008)



*Gambar 2. 1 Siklus Produksi Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap*

Pada Gambar 2.1 dapat terlihat bahwa proses produksi listrik pada PLTGU adalah sebagai berikut.

#### 1. *Air Compressor*

*Air compressor* adalah perangkat yang menyediakan udara bertekanan tinggi dari udara di sekitar *air compressor* yang digunakan untuk membantu proses pembakaran di *combustion chamber* (ruang bakar). Injeksi udara ini meningkatkan efisiensi pembakaran dengan memastikan campuran bahan bakar dan udara yang optimal. (Boyce, 2002)

#### 2. *Gas Pump*

*Gas Pump* adalah komponen yang digunakan untuk memindahkan dan mengatur aliran dan tekanan bahan bakar gas berupa *Compress Natural Gas* (CNG) ke sistem pembakaran turbin gas (*combustion chamber*). Gas pump ini memastikan pasokan bahan bakar yang stabil dan aman untuk proses pembakaran yang efisien. (Boyce, 2002)

#### 3. *Combustion Chamber*

*Combustion Chamber* adalah komponen yang berfungsi untuk membakar campuran bahan bakar dan udara guna menghasilkan energi panas. Di dalam *combustion chamber* (ruang bakar) terdapat prinsip segitiga api, dimana akan ada proses pembakaran udara oleh bahan bakar berupa *compress natural gas* setelah dipicu oleh alat pemicu (*igniter*) sehingga akan menghasilkan energi panas berupa gas yang bertekanan tinggi. Energi panas ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin gas. (Boyce, 2002)

#### 4. *Gas Turbine*

Gas Turbine adalah komponen yang mengubah energi dari bahan bakar menjadi energi mekanik. Gas panas bertekanan tinggi dari *combustion chamber* mengalir melalui turbin, menyebabkan bilah-bilah turbin berputar. Putaran turbin ini menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. (Boyce, 2002)

#### 5. *Generator*

Generator adalah komponen utama yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Karena turbin berada pada satu poros dengan generator maka ketika turbin berputar, secara otomatis generator juga akan berputar dan akan merubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. (Boyce, 2002)

#### 6. *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*

*Heat Recovery Steam Generator (HRSG)* adalah komponen yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem dengan memanfaatkan panas sisa dari gas buang turbin gas untuk menghasilkan uap. Uap ini kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin uap dan generator sehingga menghasilkan listrik tambahan. HRSG meningkatkan efisiensi termal keseluruhan pembangkit listrik, memungkinkan lebih banyak energi dihasilkan dari jumlah bahan bakar yang sama. (Boyce, 2002)

#### 7. *Steam Turbine*

*Steam Turbine* adalah komponen yang mengubah energi termal dari uap dengan tekanan tinggi yang dihasilkan oleh HRSG menjadi energi mekanik, dengan mengalirkan uap panas ke bilah-bilah turbin yang kemudian memutar turbin dan generator sehingga menghasilkan energi listrik. (Kehlhofer, 2009)

#### 8. *Generator*

Generator adalah komponen utama yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator ini digerakkan oleh turbin uap yang digerakkan dengan uap bertekanan tinggi. Ketika uap bertekanan tinggi melewati bilah turbin uap, energi termal dari uap dikonversi menjadi energi mekanik dalam bentuk rotasi poros turbin. Poros turbin ini kemudian terhubung ke generator, yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. (Kehlhofer, 2009)

#### 9. *Condenser*

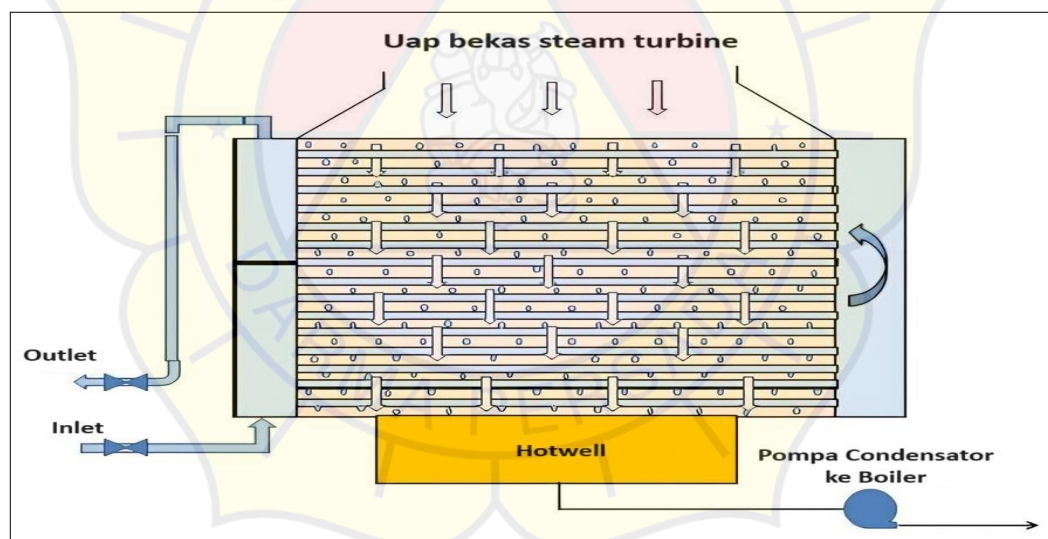
*Condenser* adalah komponen yang berfungsi untuk mengkondensasikan uap bekas dari turbin uap menjadi air. Proses ini dilakukan dengan menurunkan suhu uap hingga mencapai titik kondensasi. Uap yang masuk ke *condenser* akan melewati pipa-pipa pendingin yang di dalamnya terdapat air pendingin yang diambil dari sumber air terdekat seperti sungai, danau, atau laut. Dengan mengkondensasikan uap kembali menjadi air, kondenser memungkinkan penggunaan kembali air dalam siklus uap. Ini meningkatkan efisiensi termal sistem. (Kehlhofer, 2009)

## 10. Pompa Ekstraksi Kondensat

Pompa Ekstraksi Kondensat (*Condensate Extraction Pump*) adalah komponen kunci yang digunakan untuk memompa dan meningkatkan tekanan air kondensat (air yang telah terkondensasi dari uap) dari hotwell di bagian bawah *condenser* sehingga bisa dialirkan ke sistem pemanasan ulang atau ke boiler feedwater system. Dengan mengembalikan air kondensat yang telah terkondensasi ke siklus uap, pompa ekstraksi kondensat membantu menjaga siklus air tetap tertutup dan efisien. (Kehlhofer, 2009)

## 2.2 Kondensor

Kondensor adalah komponen yang berfungsi untuk mengkondensasikan uap bekas dari turbin uap menjadi air. Proses ini dilakukan dengan menurunkan suhu uap hingga mencapai titik kondensasi. Uap yang masuk ke condenser akan melewati pipa-pipa pendingin yang di dalamnya terdapat air pendingin yang diambil dari sumber air terdekat seperti sungai, danau, atau laut. (Kehlhofer, 2009)



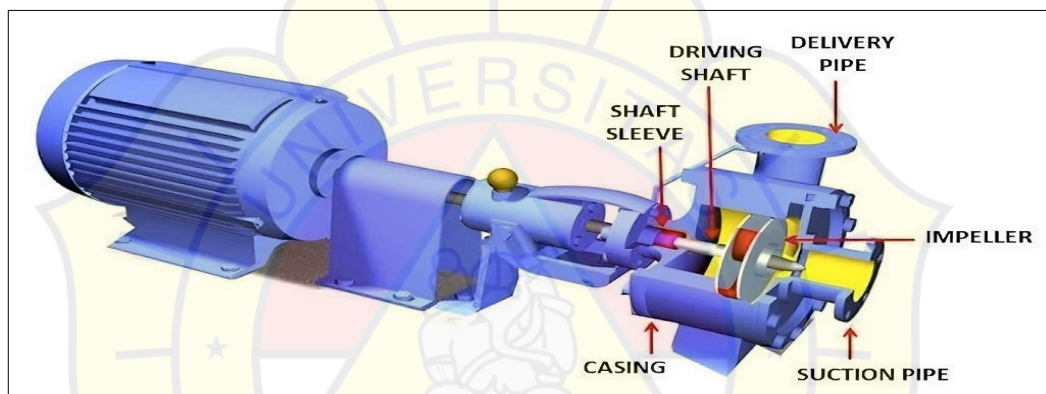
Gambar 2. 2 Kondensor

Pada kondensor terdapat siklus yang saling berkaitan yaitu siklus fluida panas yang berasal dari uap keluar turbin bertekanan rendah dan siklus air pendingin yang diperoleh dari air laut, yang mana keduanya saling bersilangan arah (*cross flow*). Uap bekas turbin tekanan rendah sebagai fluida panas dalam bentuk yang berada di luar pipa kondensor akan melepaskan panas ke air pendingin yang melewati pipa (*tube*) di dalam kondensor sebagai fluida dingin. Air di dalam *hotwell* bebas dari tekanan dan kevakuman. Oleh karena itu diperlukan pompa condensator

untuk menaikkan level air agar dapat dialirkan ke breather yang terletak pada ketinggian tertentu, sehingga air dapat mengalir ke siklus berikutnya yaitu boiler pada *Heat Recovery Steam Generator (HRSG)*. (Kehlhofer, 2009)

### 2.3 Pompa Ekstraksi Kondensat

Pompa Ekstraksi Kondensat adalah komponen kunci yang digunakan untuk memompa dan meningkatkan tekanan air kondensat (air yang telah terkondensasi dari uap) dari hotwell di bagian bawah *condenser* sehingga bisa dialirkan ke sistem pemanasan ulang atau ke boiler feedwater system. Dengan mengembalikan air kondensat yang telah terkondensasi ke siklus uap, pompa ekstraksi kondensat membantu menjaga siklus air tetap tertutup dan efisien. (Kehlhofer, 2009)



Gambar 2. 3 Pompa Ekstraksi Kondensat

Pompa Ekstraksi Kondensat adalah jenis pompa sentrifugal poros yang bagian utamanya berupa motor penggerak dengan impeller yang berputar dengan kecepatan tinggi. Pada pompa sentrifugal, percepatan aliran fluida dilakukan oleh gaya sentrifugal dari impeller yang berputar dengan bantuan motor induksi. Ketika impeller berputar di dalam rumah atau selubung pompa (casing), secara fisis energi kinetik impeller akan mengakibatkan perubahan tekanan pada selubung pompa sehingga cairan akan masuk melalui pipa pengisap (suction pipe) dan dikeluarkan melalui pipa pelepasan (delivery pipe). (Kehlhofer, 2009)

Pompa Ekstraksi Kondensat digerakkan oleh sebuah motor listrik induksi 3 fasa yang dioperasikan secara otomatis atau manual, untuk system pengoperasian otomatis motor listrik Pompa Ekstraksi Kondensat dapat dilakukan melalui ruang control dan untuk sistem pengoperasian manual motor listrik Pompa Ekstraksi Kondensat dilakukan secara langsung dengan menekan langsung tombol atau fitur yang terdapat pada panel motor listrik Pompa Ekstraksi Kondensat.

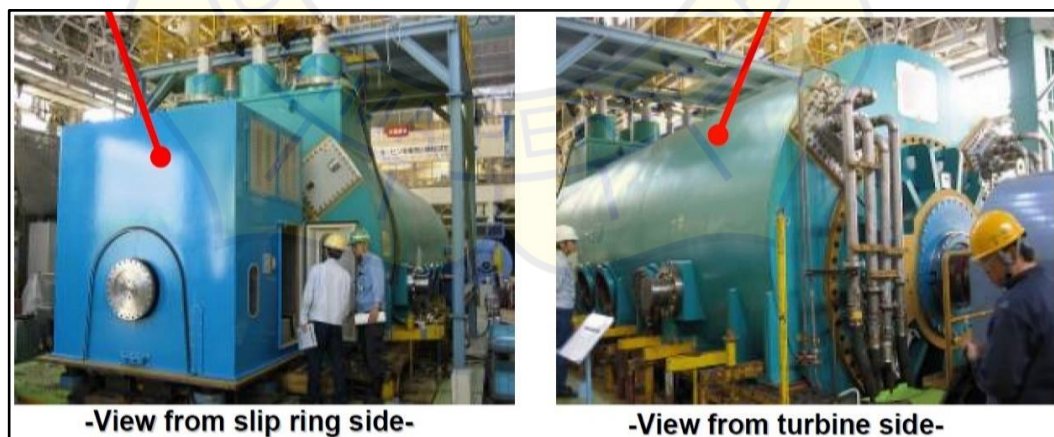


## 2.4 Sumber Tegangan untuk Motor Pompa Ekstraksi Kondensat

Generator dan transformator merupakan komponen yang sangat penting di sistem pembangkit tenaga listrik. Terdapat dua jenis generator di sistem PLTGU Blok II UP Muara Karang, yaitu Generator Turbin Gas dan Generator Turbin Uap. Tegangan output yang dihasilkan Generator Turbin Gas disambungkan ke 1 *Main Transformator* dan 1 *Unit Auxiliary Transformator*, sedangkan tegangan output yang dihasilkan Generator Turbin Uap disambungkan ke 1 *Main Transformator*. Motor induksi pompa ekstraksi kondensat di PLTGU Blok II Muara Karang memperoleh suplai tegangan yang berasal dari panel listrik GT2 6,5 kV MV Swicthgear yang sumber tegangannya diperoleh dari tegangan output Generator Turbin Gas sebesar 16,5 kV yang diturunkan dengan menggunakan *Unit Auxiliary Tranformator* menjadi tegangan sebesar 6,5 kV. (Mitsubishi Heavy Industries Ltd. & Takasago Machinery Works, 2010)

### 2.4.1 Generator Turbin Gas

Generator Turbin Gas adalah generator yang menghasilkan energi listrik dengan mengubah tenaga mekanik yang dihasilkan oleh turbin gas pada siklus PLTGU. Generator Turbin Gas menggunakan generator sinkron yang menghasilkan kecepatan putar rotor dengan kutub magnet memiliki putaran dengan kecepatan yang sinkron terhadap putaran medan pada statornya. (Muslim et al., 2008)



Gambar 2. 4 Generator Turbin Gas

Tegangan output sebesar 16,5 kV yang dihasilkan Generator Turbin Gas PLTGU Blok II UP Muara Karang disambungkan ke 1 *Main Transformator* untuk dinaikkan tegangannya menjadi 157,5 kV dan 1 *Unit Auxiliary Transformator* untuk diturunkan tegangannya menjadi 6,5 kV.

### 2.4.2 Unit Auxiliary Transformer

Terdapat dua jenis transformator untuk penggunaan daya sendiri yaitu *Station Service Transformer (SST)* dan *Unit Auxiliary Transformer (UAT)*. Transformator tersebut diperlukan untuk menyuplai komponen bantu yang membutuhkan daya listrik dengan tegangan yang sesuai. Daya SST diperoleh dari jaringan distribusi sedangkan Daya UAT diperoleh dari keluaran generator. *Unit Auxiliary Transformer (UAT)* merupakan transformator penurun tegangan yang digunakan untuk beban dari sistem kelistrikan pemakaian sendiri yang membutuhkan suplai listrik tegangan rendah. Pada sistem kelistrikan pusat listrik skala kecil dan menengah, suplai daya UAT dapat diambil langsung dari daya keluaran generator. (Winders, 2002)



*Gambar 2. 5 Unit Auxiliary Transformator*

*Unit Auxiliary Transformator (UAT)* di PLTGU Blok II UP Muara Karang digunakan untuk menurunkan tegangan output generator sebesar 16,5 kV ke tegangan 6,5 kV untuk menyuplai beberapa peralatan motor induksi dan pompa yang membutuhkan suplai tegangan sebesar 6000 V seperti motor pompa ekstraksi kondensat, *Sea Water Booster Pump Motor*, *ST Closed Cooling Water Pump Motor*, *HP Feedwater Pump C Motor* dan *Circulating Water Pump* di PLTGU Blok II Unit Pembangkitan Muara Karang. (Mitsubishi Heavy Industries Ltd. & Takasago Machinery Works, 2010)

## 2.5 Motor Induksi

Motor induksi adalah alat listrik yang mengubah energi listrik arus bolak-balik (AC) menjadi energi mekanik untuk memutar suatu beban. Nama ini berasal dari prinsip kerja motor ini yang beroperasi berdasarkan induksi medan magnet stator ke belitan rotor, dimana arus rotor motor ini merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. (Chapman, 2012)

Motor induksi banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari, baik di industri maupun di rumah. Motor induksi yang umum digunakan adalah motor induksi tiga fasa dan motor induksi satu fasa. Motor induksi tiga fasa beroperasi pada sistem tenaga tiga fasa dan banyak digunakan di banyak sektor industri berdaya tinggi. Motor induksi satu fasa beroperasi pada sistem kelistrikan satu fasa dan banyak digunakan terutama pada peralatan rumah tangga seperti kipas angin, lemari es, pompa air, mesin cuci karena motor induksi satu fasa mempunyai daya keluaran yang rendah. (Miller & Miller, 2004)



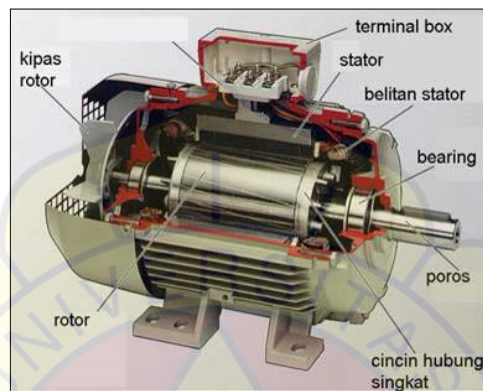
*Gambar 2. 6 Motor Induksi 3 Fasa*

Motor induksi tiga fasa bekerja dengan kecepatan konstan, dari tanpa beban hingga beban penuh. Kecepatan putaran motor ini dipengaruhi oleh frekuensi sehingga pengaturan kecepatan tidak dapat dilakukan dengan mudah pada motor ini. Namun motor induksi tiga fasa memiliki beberapa keunggulan yaitu sederhana, kokoh dalam konstruksi, relatif murah, mudah perawatannya, dan dapat diproduksi dengan spesifikasi sesuai dengan kebutuhan industri. (Chapman, 2012)



### 2.5.1 Konstruksi Motor Induksi

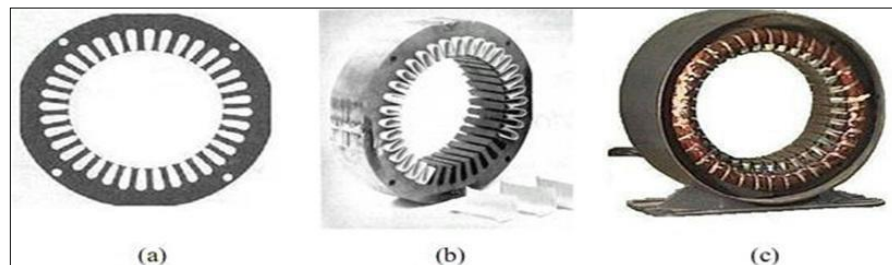
Struktur detail motor induksi meliputi dua bagian yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian motor yang diam, terdiri dari badan motor, inti stator, belitan stator, bearing dan terminal box. Bagian rotor adalah bagian motor yang berputar, terdiri atas rotor sangkar, poros rotor. Pada konstruksi motor induksi bagian rotor tidak bersentuhan dengan stator, karena pada motor induksi tidak terdapat sikat arang, konstruksi motor induksi dapat dilihat pada gambar 2.7. (Parsa & Bagia, 2018)



*Gambar 2. 7 Konstruksi Motor Induksi*

#### a. Stator

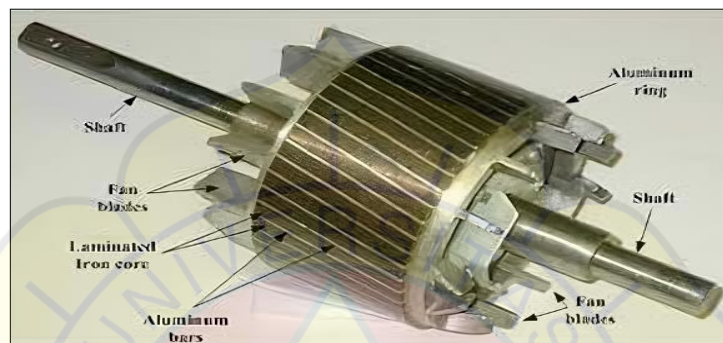
Stator adalah bagian terluar dari motor yang merupakan bagian yang diam dan mengalirkan arus fasa. Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris. Alur pada tumpukan laminasi inti diisolasi dengan kertas (Gambar 2.8 b). Tiap elemen laminasi ini dibentuk dari lembaran besi (Gambar 2.8 a). Setiap pelat besi tersebut memiliki banyak alur dan banyak lubang pemasangan untuk menyatukan inti. Kawat kumparan yang digunakan terbuat dari tembaga yang dilapis dengan isolasi tipis, kemudian tumpukan inti dan belitan stator diletakkan dalam cangkang silindris (Gambar 2.8 c). (Parsa & Bagia, 2018)



*Gambar 2. 8 (a) Lempengan Inti, (b) Tumpukan Inti Stator, (c) Cangkang Stator*

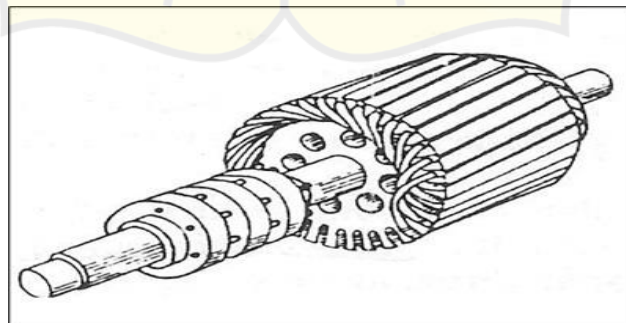
### b. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar di dalam motor. Terdapat dua jenis rotor dalam motor induksi tiga fasa yaitu rotor sangkar (squirrel cage rotor) dan rotor belitan (wound rotor). Rotor sangkar adalah tipe rotor pada motor induksi yang tersusun oleh beberapa batangan logam yang dimasukkan melewati slot-slot yang ada pada rotor motor induksi, kemudian setiap bagian disatukan oleh cincin sehingga membuat batangan logam terhubung singkat dengan batangan logam yang lain. Konstruksi rotor sangkar dapat dilihat pada Gambar 2.9. (Parsa & Bagia, 2018)



*Gambar 2. 9 Konstruksi Rotor Sangkar*

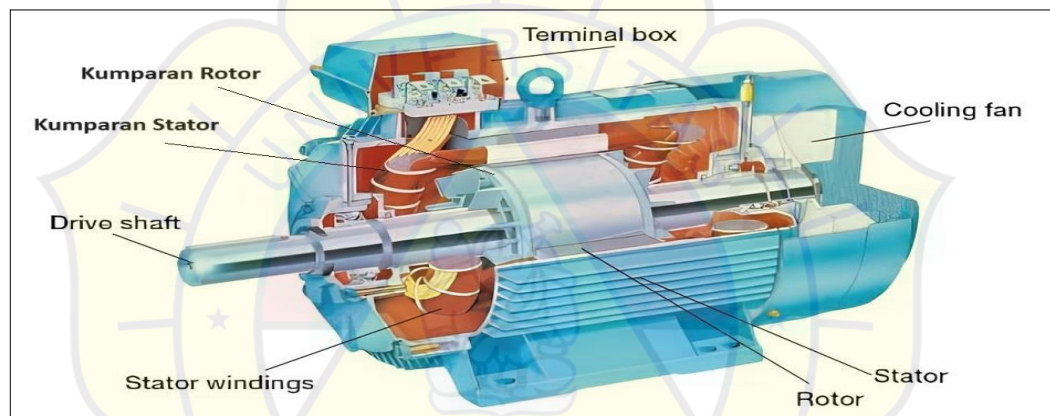
Sementara itu pada rotor belitan, rotornya dibentuk dari satu set belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan statornya. Biasanya belitan tiga fasa dari rotor ini terhubung bintang (Y), kemudian setiap ujung dari tiga kawat rotor tersebut diikatkan pada slip rings yang berada pada poros rotor. Pada motor induksi rotor belitan, rangkaian rotornya dirancang untuk dapat disisipkan dengan tahanan eksternal, dimana hal ini akan memberikan keuntungan dalam memodifikasi karakteristik torsi-kecepatan dari motor itu sendiri. Konstruksi rotor belitan dapat dilihat pada Gambar 2.10. (Chapman, 2012)



*Gambar 2. 10 Konstruksi Rotor Belitan*

### 2.5.2 Prinsip Kerja Motor Induksi 3 Fasa

Motor induksi beroperasi berdasarkan induksi elektromagnetik dari kumparan stator ke kumparan rotor. Jika kumparan stator dihubungkan dengan sumber tegangan tiga fasa, maka kumparan stator tersebut akan menimbulkan medan magnet berputar. Medan magnet putar stator akan memotong kumparan rotor. Akibatnya akan timbul GGL induksi pada kumparan rotor, karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup maka GGL akan menginduksi arus ke kumparan rotor. Adanya arus pada medan magnet akan menimbulkan gaya Lorentz pada rotor. Jika kopel awal yang dihasilkan oleh gaya yang diterapkan pada rotor cukup besar untuk mendukung kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan magnet putar stator. (Parsa & Bagia, 2018)



*Gambar 2. 11 Bagian Dalam Motor Induksi 3 Fasa*

Semakin bertambahnya beban motor maka putaran rotor akan menurun. Pada rangka stator terdapat kumparan stator yang ditempatkan pada slot-slot yang dililitkan pada sejumlah kutub. Jumlah kutub menentukan kecepatan putaran medan magnet stator yang diinduksi pada rotor. Semakin banyak kutub maka semakin rendah kecepatan putaran medan magnet stator. Kecepatan berputarnya medan ini disebut kecepatan sinkron. (Parsa & Bagia, 2018)

$$N_s = \frac{120 \times f}{p} \dots\dots\dots(2-1)$$

Dimana:

$N_s$  : Kecepatan sinkron atau putar dari medan putar stator (rpm)

$F$  : Frekuensi arus dan tegangan stator (Hz)

$p$  : Jumlah kutub

Peningkatan beban akan meningkatkan kopel motor dan meningkatkan arus induksi pada rotor dan mengurangi putaran rotor sehingga terjadi perbedaan putaran relatif antara medan magnet putar stator dengan putaran rotor semakin besar. Perbedaan putaran relatif antara putaran medan putar stator ( $N_s$ ) dan putaran rotor ( $N_r$ ) ini disebut dengan slip ( $S$ ). (Parsa & Bagia, 2018)

$$S = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \times 100 \% \dots\dots\dots(2-2)$$

Dimana:

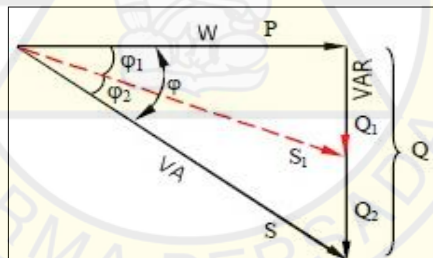
$S$  : Slip (%)

$N_s$  : Kecepatan putar medan stator (rpm)

$N_r$  : Kecepatan putar rotor (rpm)

## 2.6 Daya Motor Induksi 3 Fasa

Daya listrik adalah jumlah energi yang dikonsumsi dalam suatu rangkaian atau jaringan listrik. Daya listrik menunjukkan jumlah energi listrik yang digunakan setiap detik. Satuan daya listrik adalah Watt. Di mana 1 Watt = 1 Joule/detik. Pada dasarnya daya listrik dibagi menjadi 3 yaitu, daya aktif (Watt), daya Semu (VA), daya reaktif (VAR). (Kirtley, 2011)



Gambar 2. 12 Segitiga Daya

Berdasarkan segitiga daya, maka daya semu berada pada sisi miring ( $S$ ) sedangkan daya aktif ( $P$ ) dan daya reaktif ( $Q$ ) berada pada sisi-sisi segitiga yang saling tegak lurus. Sudut  $\phi$  adalah sudut yang dibentuk antara sisi daya aktif ( $P$ ) dan daya semu ( $S$ ), sedangkan daya reaktif ( $Q$ ) tegak lurus terhadap daya aktif ( $P$ ).

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2-3)$$

Dimana:

$\cos \phi$  : Faktor daya

$P$  : Daya aktif (Watt)

$S$  : Daya semu (VA)

- a. Daya aktif (P) adalah daya aktual yang diperlukan untuk beban dan pada umumnya nilai daya aktif lebih kecil dari daya semu. Daya aktif akan berkurang nilainya karena beban listrik menimbulkan daya reaktif. Daya Aktif dihasilkan dari hasil perkalian Daya Semu dengan Faktor Daya ( $\cos \phi$ ). (Kirtley, 2011)

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi \dots\dots\dots(2-4)$$

Dimana:

P : Daya aktif (Watt)

V : Tegangan (V)

I : Arus (A)

$\cos \phi$  : Faktor daya

- b. Daya reaktif (Q) adalah daya yang mengakibatkan terjadinya rugi - rugi daya atau daya yang menyebabkan terjadinya penurunan nilai faktor daya ( $\cos \phi$ ), satuannya adalah volt ampere reaktif (VAR). Untuk menghemat daya reaktif dapat dilakukan dengan memasang kapasitor pada rangkaian yang memiliki beban bersifat induktif. (Kirtley, 2011)

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \dots\dots\dots(2-5)$$

dimana:

Q : daya reaktif (VAR)

S : daya semu (VA)

P : daya nyata (W)

- c. Daya semu (S) adalah daya yang dihasilkan dari perhitungan listrik sebelum dibebani dengan beban listrik. Beban yang bersifat daya semu adalah beban yang bersifat resistansi (R), peralatan listrik atau beban pada rangkaian listrik yang bersifat resistansi tidak dapat dihemat karena tegangan dan arus listrik mempunyai faktor daya sebesar 1. (Kirtley, 2011)

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \dots\dots\dots(2-6)$$

dimana:

S : daya semu (VA)

V : tegangan (V)

I : arus (A)



## 2.7 Efisiensi Daya Motor Induksi 3 Fasa

Efisiensi daya motor induksi didefinisikan sebagai ukuran keefektifan motor induksi dalam mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, yang dinyatakan sebagai perbandingan antara daya keluaran dan daya masukan. Semakin tinggi hasil persentase perbandingan yang dinyatakan dalam persentase (%), semakin baik pula efisiensi daya motor yang digunakan. (Amin, 2001)

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \dots\dots\dots(2-7)$$

Dimana:

$\eta$  : efisiensi (%)  
 $P_{output}$  : daya keluaran (kW)  
 $P_{input}$  : daya masukan (kW)

Pada motor induksi yang sedang beroperasi dan terhubung dengan banyak mesin dan perangkat lain di suatu industri dibutuhkan suatu metode untuk menghitung nilai efisiensinya, karena sulit untuk menghitung nilai efisiensi dengan metode pengukuran rugi-rugi pada motor induksi yang mengharuskan untuk memutus motor induksi dengan perangkat lain yang terhubung dalam siklus produksi di suatu industri.

Metode *Voltage Compensated Amperage Ratio* adalah metode mencari nilai efisiensi motor induksi dengan membandingkan daya nominal motor pada nameplate yang dikalikan dengan rasio beban motor terhadap daya output motor. Metode *Voltage Compensated Amperage Ratio* merupakan metode yang digunakan untuk mencari nilai efisiensi motor induksi dengan usia pemakaian yang lama dan sudah mengalami reparasi, sehingga penghitungannya hanya menggunakan data hasil pengukuran kelistrikan, seperti besaran arus, tegangan antar fasa dan faktor daya tanpa harus menghentikan operasional pompa yang terhubung dengan banyak mesin yang sedang beroperasi. Penggunaan metode ini hanya dapat digunakan jika nilai arus output hasil pengukuran lebih besar dari 60% nilai arus yang tertera pada *name plate* spesifikasi motor. (Kementerian PUPR, 2014)

Adapun metode penghitungan nilai efisiensi daya motor induksi dengan teknik *Voltage Compensated Amperage Ratio*, adalah sebagai berikut:

a. Pengukuran Rasio Beban

$$\text{Rasio Beban} = \frac{I_{ukur} \times V_{ukur}}{I_{np} \times V_{np}} \dots\dots\dots(2-8)$$

Dimana:

$I_{ukur}$  : Arus terukur rata-rata dari ketiga fasa (A)

$V_{ukur}$  : Tegangan terukur rata-rata antar fasa (V)

$I_{np}$  : Arus sesuai name plate (A)

$V_{np}$  : Tegangan antar fasa sesuai name plate (V)

b. Setelah beban motor diketahui, maka efisiensi daya motor dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{np} \times RB}{P_o} \times 100\% \dots\dots\dots(2-9)$$

$\eta$  : efisiensi motor induksi (%)

$P_{np}$  : Daya nominal motor sesuai name plate (kW)

$P_o$  : Daya output (kW)

RB : Rasio Beban

## 2.8 Standar Kelistrikan IEC (International Electrotechnical Commission)

IEC (*International Electrotechnical Commission*) atau Komisi Elektroteknik Internasional merupakan suatu lembaga standarisasi internasional nirlaba yang meneliti dan menerbitkan standar internasional terkait teknologi kelistrikan, elektronika dan teknologi atau dikenal dengan “elektroteknologi”. Penyusunan standar IEC dilakukan oleh komite nasional (*national committes*) yang mewakili berbagai pihak yang terlibat dalam standarisasi bidang elektroteknik di suatu negara. Komite nasional diisi oleh pihak produsen, pihak pemerintah, penyedia layanan, badan standarisasi nasional, lembaga profesional, distributor, vendor, pelanggan, pengguna, dan asosiasi perdagangan. Pembentukan keanggotaan komite nasional diatur secara terpisah dengan 90% anggota yang menyusun standar IEC bekerja di sektor industri. Beberapa anggota komite berlatar belakang di pemerintahan dan swasta. (Szopa & Soares, 2021)

### 2.8.1 Standar Efisiensi Motor Listrik IEC 60034-30-1:2014

Standar IEC 60034-30-1 adalah standar klasifikasi efisiensi daya motor listrik internasional yang diterbitkan oleh International Electrotechnical Commission (IEC) pada tanggal 6 Maret 2014. Standar klasifikasi efisiensi daya motor listrik IEC 60034-30-1 mencakup motor listrik dengan kriteria seperti motor listrik dengan daya output 0,12 kW hingga 1000 kW, motor listrik dengan frekuensi 50 dan 60 Hz, motor listrik dengan metode starting direct online, motor listrik dengan jumlah kutub 2, 4, 6 atau 8 kutub, motor listrik dengan daya output 0,12 kW hingga 1000 kW, motor listrik yang mampu beroperasi terus-menerus pada daya yang ditetapkan dengan kenaikan suhu dalam kelas suhu isolasi yang ditentukan, motor listrik dengan suhu lingkungan dalam kisaran -20 °C hingga 60 °C, motor listrik dengan ketinggian hingga 4000 m di atas permukaan laut. (ABB, 2014)

Efisiensi motor listrik dibagi menjadi beberapa kategori sesuai dengan persentase nilai efisiensi yang dihasilkan. IEC telah menerbitkan klasifikasi mengenai nilai efisiensi motor listrik. Berdasarkan IEC 60034-30-1:2014, efisiensi motor induksi diklasifikasikan seperti diperlihatkan pada tabel 2.1.

*Tabel 2. 1 Klasifikasi Efisiensi Motor Listrik IEC 60034-30-1:2014*

| Kelas Efisiensi Motor Listrik   | Tingkatan Kategori |
|---------------------------------|--------------------|
| <i>Standard Efficiency</i>      | IE1                |
| <i>High Efficiency</i>          | IE2                |
| <i>Premium Efficiency</i>       | IE3                |
| <i>Super Premium Efficiency</i> | IE4                |

Berdasarkan tabel 2.1 maka IE1 didefinisikan sebagai *Standard Efficiency* yaitu kelas efisiensi motor listrik minimum, IE2 didefinisikan sebagai *High Efficiency*, IE3 didefinisikan sebagai *Premium Efficiency* dan IE4 didefinisikan sebagai *Super Premium Efficiency* yaitu kelas efisiensi daya motor listrik paling tinggi pada standar IEC 60034-30-1:2014.

Nilai minimum efisiensi motor listrik 50 Hz kelas IE1 (*Standard Efficiency*) dan IE2 (*High Efficiency*) IEC 60034-30-1:2014 terdapat pada tabel 2.2 berikut.

*Tabel 2. 2 Efisiensi Motor 50 Hz IE1 dan IE2 menurut IEC 60034-30-1:2014*

| Output<br>(kW) | Standard Efficiency-IE1 (50 Hz) |            |            |            | High Efficiency-IE2 (50 Hz) |            |            |            |
|----------------|---------------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------|------------|------------|------------|
|                | 2 pole (%)                      | 4 pole (%) | 6 pole (%) | 8 pole (%) | 2 pole (%)                  | 4 pole (%) | 6 pole (%) | 8 pole (%) |
| 0.12           | 45.0                            | 50.0       | 38.3       | 31.0       | 53.6                        | 59.1       | 50.6       | 39.8       |
| 0.18           | 52.8                            | 57.0       | 45.5       | 38.0       | 60.4                        | 64.7       | 56.6       | 45.9       |
| 0.20           | 54.6                            | 58.5       | 47.6       | 39.7       | 61.9                        | 65.9       | 58.2       | 47.4       |
| 0.25           | 58.2                            | 61.5       | 52.1       | 43.4       | 64.8                        | 68.5       | 61.6       | 50.6       |
| 0.37           | 63.9                            | 66.0       | 59.7       | 49.7       | 69.5                        | 72.7       | 67.6       | 56.1       |
| 0.40           | 64.9                            | 66.8       | 61.1       | 50.9       | 70.4                        | 73.5       | 68.8       | 57.2       |
| 0.55           | 69.0                            | 70.0       | 65.8       | 56.1       | 74.1                        | 77.1       | 73.1       | 61.7       |
| 0.75           | 72.1                            | 72.1       | 70.0       | 61.2       | 77.4                        | 79.6       | 75.9       | 66.2       |
| 1.1            | 75.0                            | 75.0       | 72.9       | 66.5       | 79.6                        | 81.4       | 78.1       | 70.8       |
| 1.5            | 77.2                            | 77.2       | 75.2       | 70.2       | 81.3                        | 82.8       | 79.8       | 74.1       |
| 2.2            | 79.7                            | 79.7       | 77.7       | 74.2       | 83.2                        | 84.3       | 81.8       | 77.6       |
| 3              | 81.5                            | 81.5       | 79.7       | 77.0       | 84.6                        | 85.5       | 83.3       | 80.0       |
| 4              | 83.1                            | 83.1       | 81.4       | 79.2       | 85.8                        | 86.6       | 84.6       | 81.9       |
| 5.5            | 84.7                            | 84.7       | 83.1       | 81.4       | 87.0                        | 87.7       | 86.0       | 83.8       |
| 7.5            | 86.0                            | 86.0       | 84.7       | 83.1       | 88.1                        | 88.7       | 87.2       | 85.3       |
| 11             | 87.6                            | 87.6       | 86.4       | 85.0       | 89.4                        | 89.8       | 88.7       | 86.9       |
| 15             | 88.7                            | 88.7       | 87.7       | 86.2       | 90.3                        | 90.6       | 89.7       | 88.0       |
| 18.5           | 89.3                            | 89.3       | 88.6       | 86.9       | 90.9                        | 91.2       | 90.4       | 88.6       |
| 22             | 89.9                            | 89.9       | 89.2       | 87.4       | 91.3                        | 91.6       | 90.9       | 89.1       |
| 30             | 90.7                            | 90.7       | 90.2       | 88.3       | 92.0                        | 92.3       | 91.7       | 89.8       |
| 37             | 91.2                            | 91.2       | 90.8       | 88.8       | 92.5                        | 92.7       | 92.2       | 90.3       |
| 45             | 91.7                            | 91.7       | 91.4       | 89.2       | 92.9                        | 93.1       | 92.7       | 90.7       |
| 55             | 92.1                            | 92.1       | 91.9       | 89.7       | 93.2                        | 93.5       | 93.1       | 91.0       |
| 75             | 92.7                            | 92.7       | 92.6       | 90.3       | 93.8                        | 94.0       | 93.7       | 91.6       |
| 90             | 93.0                            | 93.0       | 92.9       | 90.7       | 94.1                        | 94.2       | 94.0       | 91.9       |
| 110            | 93.3                            | 93.3       | 93.3       | 91.1       | 94.3                        | 94.5       | 94.3       | 92.3       |
| 132            | 93.5                            | 93.5       | 93.5       | 91.5       | 94.6                        | 94.7       | 94.6       | 92.6       |
| 160            | 93.8                            | 93.8       | 93.8       | 91.9       | 94.8                        | 94.9       | 94.8       | 93.0       |
| 200            | 94.0                            | 94.0       | 94.0       | 92.5       | 95.0                        | 95.1       | 95.0       | 93.5       |
| 250            | 94.0                            | 94.0       | 94.0       | 92.5       | 95.0                        | 95.1       | 95.0       | 93.5       |
| 315            | 94.0                            | 94.0       | 94.0       | 92.5       | 95.0                        | 95.1       | 95.0       | 93.5       |
| 355            | 94.0                            | 94.0       | 94.0       | 92.5       | 95.0                        | 95.1       | 95.0       | 93.5       |
| 400            | 94.0                            | 94.0       | 94.0       | 92.5       | 95.0                        | 95.1       | 95.0       | 93.5       |
| 450            | 94.0                            | 94.0       | 94.0       | 92.5       | 95.0                        | 95.1       | 95.0       | 93.5       |
| 500-1000       | 94.0                            | 94.0       | 94.0       | 92.5       | 95.0                        | 95.1       | 95.0       | 93.5       |

Berdasarkan tabel 2.2, klasifikasi standar efisiensi motor listrik IEC 60034-30-1 kelas IE1 dan kelas IE2 digunakan untuk jenis motor listrik dengan spesifikasi single speed, satu fasa dan tiga fasa, menggunakan 2,4,6, atau 8 pole. Daya output motor mulai dari 0,12 kW sampai dengan 1.000 kW dan frekuensi yang digunakan 50 Hz - 60 Hz.

Nilai minimum efisiensi motor listrik 50 Hz kelas IE3 (*Premium Efficiency*) dan IE4 (*Super Premium Efficiency*) IEC 60034-30-1:2014 terdapat pada tabel 2.3.

*Tabel 2. 3 Efisiensi Motor 50 Hz IE3 dan IE4 menurut IEC 60034-30-1:2014*

| Output<br>(kW) | Premium Efficiency-IE3 (50 Hz) |            |            |            | Super Premium Efficiency-IE4 (50 Hz) |            |            |            |
|----------------|--------------------------------|------------|------------|------------|--------------------------------------|------------|------------|------------|
|                | 2 pole (%)                     | 4 pole (%) | 6 pole (%) | 8 pole (%) | 2 pole (%)                           | 4 pole (%) | 6 pole (%) | 8 pole (%) |
| 0.12           | 60.8                           | 64.8       | 57.7       | 50.7       | 66.5                                 | 69.8       | 64.9       | 62.3       |
| 0.18           | 65.9                           | 69.9       | 63.9       | 58.7       | 70.8                                 | 74.7       | 70.1       | 67.2       |
| 0.20           | 67.2                           | 71.1       | 65.4       | 60.6       | 71.9                                 | 75.8       | 71.4       | 68.4       |
| 0.25           | 69.7                           | 73.5       | 68.6       | 64.1       | 74.3                                 | 77.9       | 74.1       | 70.8       |
| 0.37           | 73.8                           | 77.3       | 73.5       | 69.3       | 78.1                                 | 81.1       | 78.0       | 74.3       |
| 0.40           | 74.6                           | 78.0       | 74.4       | 70.1       | 78.9                                 | 81.7       | 78.7       | 74.9       |
| 0.55           | 77.8                           | 80.8       | 77.2       | 73.0       | 81.5                                 | 83.9       | 80.9       | 77.0       |
| 075            | 80.7                           | 82.5       | 78.9       | 75.0       | 83.5                                 | 85.7       | 82.7       | 78.4       |
| 1.1            | 82.7                           | 84.1       | 81.0       | 77.7       | 85.2                                 | 87.2       | 84.5       | 80.8       |
| 1.5            | 84.2                           | 85.3       | 82.5       | 79.7       | 86.5                                 | 88.2       | 85.9       | 82.6       |
| 2.2            | 85.9                           | 86.7       | 84.3       | 81.9       | 88.0                                 | 89.5       | 87.4       | 84.5       |
| 3              | 87.1                           | 87.7       | 85.6       | 83.5       | 89.1                                 | 90.4       | 88.6       | 85.9       |
| 4              | 88.1                           | 88.6       | 86.8       | 84.8       | 90.0                                 | 91.1       | 89.5       | 87.1       |
| 5.5            | 89.2                           | 89.6       | 88.0       | 86.2       | 90.9                                 | 91.9       | 90.5       | 88.3       |
| 7.5            | 90.1                           | 90.4       | 89.1       | 87.3       | 91.7                                 | 92.6       | 91.3       | 89.3       |
| 11             | 91.2                           | 91.4       | 90.3       | 88.6       | 92.6                                 | 93.3       | 92.3       | 90.4       |
| 15             | 91.9                           | 92.1       | 91.2       | 89.6       | 93.3                                 | 93.9       | 92.9       | 91.2       |
| 18.5           | 92.4                           | 92.6       | 91.7       | 90.1       | 93.7                                 | 94.2       | 93.4       | 91.7       |
| 22             | 92.7                           | 93.0       | 92.2       | 90.6       | 94.0                                 | 94.5       | 93.7       | 92.1       |
| 30             | 93.3                           | 93.6       | 92.9       | 91.3       | 94.5                                 | 94.9       | 94.2       | 92.7       |
| 37             | 93.7                           | 93.9       | 93.3       | 91.8       | 94.8                                 | 95.2       | 94.5       | 93.1       |
| 45             | 94.0                           | 94.2       | 93.7       | 92.2       | 95.0                                 | 95.4       | 94.8       | 93.4       |
| 55             | 94.3                           | 94.6       | 94.1       | 92.5       | 95.3                                 | 95.7       | 95.1       | 93.7       |
| 75             | 94.7                           | 95.0       | 94.6       | 93.1       | 95.6                                 | 96.0       | 95.4       | 94.2       |
| 90             | 95.0                           | 95.2       | 94.9       | 93.4       | 95.8                                 | 96.1       | 95.6       | 94.4       |
| 110            | 95.2                           | 95.4       | 95.1       | 93.7       | 96.0                                 | 96.3       | 95.8       | 94.7       |
| 132            | 95.4                           | 95.6       | 95.4       | 94.0       | 96.2                                 | 96.4       | 96.0       | 94.9       |
| 160            | 95.6                           | 95.8       | 95.6       | 94.3       | 96.3                                 | 96.6       | 96.2       | 95.1       |
| 200            | 95.8                           | 96.0       | 95.8       | 94.6       | 96.5                                 | 96.7       | 96.3       | 95.4       |
| 250            | 95.8                           | 96.0       | 95.8       | 94.6       | 96.5                                 | 96.7       | 96.5       | 95.4       |
| 315            | 95.8                           | 96.0       | 95.8       | 94.6       | 96.5                                 | 96.7       | 96.6       | 95.4       |
| 355            | 95.8                           | 96.0       | 95.8       | 94.6       | 96.5                                 | 96.7       | 96.6       | 95.4       |
| 400            | 95.8                           | 96.0       | 95.8       | 94.6       | 96.5                                 | 96.7       | 96.6       | 95.4       |
| 450            | 95.8                           | 96.0       | 95.8       | 94.6       | 96.5                                 | 96.7       | 96.6       | 95.4       |
| 500-1000       | 95.8                           | 96.0       | 95.8       | 94.6       | 96.5                                 | 96.7       | 96.6       | 95.4       |

Berdasarkan tabel tabel 2.3, klasifikasi standar efisiensi motor induksi IEC 60034-30-1 kelas IE3 dan kelas IE4 digunakan untuk jenis motor listrik dengan spesifikasi single speed, satu fasa dan tiga fasa, menggunakan 2,4,6, atau 8 pole. Daya output motor mulai dari 0,12 kW sampai dengan 1.000 kW dan frekuensi yang digunakan 50 Hz - 60 Hz.