



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi

Motor listrik berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik yang berupa tenaga putar. Motor induksi merupakan motor arus bolak-balik (AC) yang paling luas digunakan. Penamaannya berasal dari kenyataan bahwa arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator.

Adapun keuntungan-keuntungan dalam menggunakan motor induksi adalah sebagai berikut:¹

1. Bentuknya yang sederhana dan memiliki konstruksi yang kuat dan hampir tidak pernah mengalami kerusakan yang berarti.
2. Harga relatif murah dan handal.
3. Efisiensi tinggi pada keadaan berputar normal, tidak memerlukan sikat sehingga rugi-rugi daya akibat gesekan berkurang.
4. Perawatan waktu mulai beroperasi tidak memerlukan *starting* tambahan khusus dan tidak harus sinkron.

Namun di samping berbagai keuntungan tersebut diatas, masih juga terdapat kerugian-kerugian dalam penggunaan motor induksi sebagai berikut:

1. Pengaturan kecepatan motor induksi sangat mempengaruhi efisiensinya.

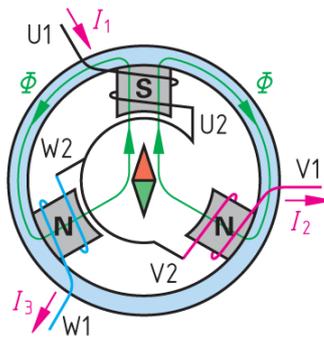
¹ Drs. Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, (Yogyakarta: Andi, 2004), hlm. 310.

- Kecepatan motor induksi akan menurun seiring dengan bertambahnya beban, tidak seperti motor DC atau motor *shunt*.
- Kopel awal mutunya rendah dibandingkan dengan motor DC *shunt*.

Penggunaan motor induksi di industri ini adalah sebagai penggerak, seperti untuk *blower*, kompresor, pompa, penggerak utama proses produksi atau *mill*, peralatan *workshop* seperti mesin-mesin bor, gerinda, *crane*, dan sebagainya.

2.2 Prinsip Kerja Motor Induksi²

Prinsip kerja motor induksi dapat dilihat dari gambar 2.1 di bawah ini:



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Motor Induksi

Sumber : Teknik Listrik Industri, 2008

Ketika tegangan fasa U masuk ke belitan stator menjadikan kutub S (*south* = selatan), garis-garis gaya magnet mengalir melalui stator, sedangkan dua kutub lainnya adalah N (*north* = utara) untuk fasa V dan fasa W. Kompas akan saling tarik menarik dengan kutub S.

Berikutnya kutub S pindah ke fasa V, kompas berputar 120°, dilanjutkan kutub S pindah ke fasa W, sehingga pada belitan stator timbul medan magnet

² Siswoyo, Teknik Listrik Industri (Jakarta :Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jendral Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), hlm. 5-4



putar. Buktinya kompas akan memutar lagi menjadi 2400. Kejadian berlangsung silih berganti membentuk medan magnet putar sehingga kompas berputar dalam satu putaran penuh, proses ini berlangsung terus menerus. Dalam motor induksi kompas digantikan oleh motor sangkar yang akan berputar pada porosnya. Karena ada perbedaan putaran antara medan putar stator dengan putaran rotor, maka disebut motor induksi tidak serempak atau motor asinkron.

2.3 Motor induksi 3 fasa

Disebut motor 3 fasa karena untuk menghasilkan tenaga mekanik, tegangan yang dimasukkan pada rotor tersebut adalah tegangan 3 fasa. Ditinjau dari jenis rotor yang digunakan, dikenal 3 jenis motor, yaitu:

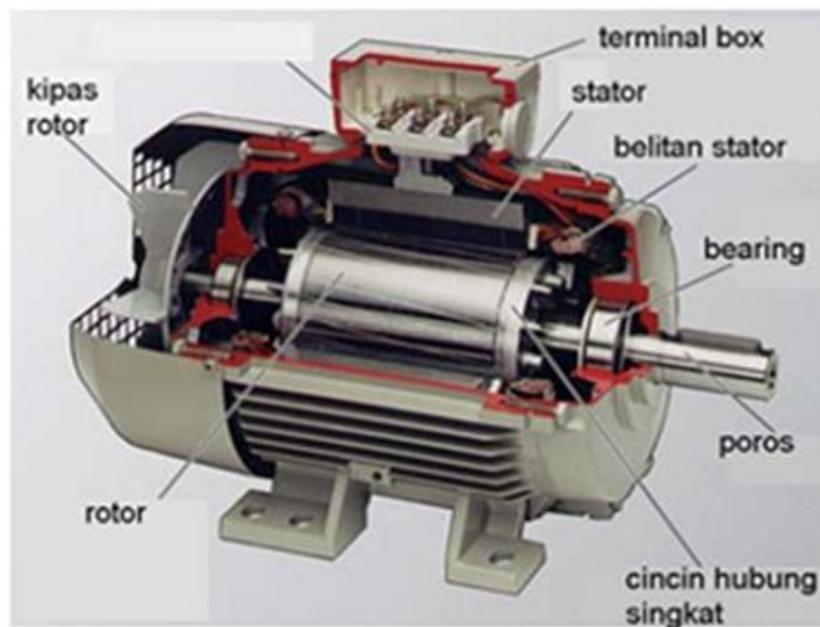
- a. Motor dengan rotor lilit
- b. Motor dengan rotor sangkar tupai
- c. Motor kolektor

Sebagai alat penggerak, motor-motor listrik lebih unggul dibandingkan alat-alat penggerak jenis lain karena motor-motor listrik dapat dikonstruksi sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik penggerakan, antara lain:

1. Bisa dibuat dalam berbagai ukuran tenaga.
2. Mempunyai batas-batas kecepatan (*speed range*) yang luas.
3. Pelayanan operasi mudah, dan pemeliharaannya sederhana.
4. Bisa dikendalikan secara manual atau secara otomatis dan bahkan kalau diinginkan bisa dilayani dari jarak jauh (*remote control*). Pemakaian motor listrik sebagai alat penggerak (misalnya untuk keperluan industri) bisa dimungkinkan dengan otomatisasi di dalam proses produksi sehingga biaya operasi bisa ditekan. Hal ini menekan biaya produksi karena sarana otomatisasi mampu menggantikan banyak peran manusia.

2.4 Konstruksi motor induksi 3 fasa

Sebuah motor induksi terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator (Lihat Gambar 2.2). Rotor merupakan bagian yang berputar dan stator merupakan bagian yang diam.



Gambar 2.2 Fisik Motor Induksi

(Sumber: Buku Teknik Listrik Industri Jilid II, 2008)

Konstruksi motor induksi lebih sederhana dibandingkan dengan motor DC, dikarenakan tidak ada komutator dan tidak ada sikat arang. Sehingga pemeliharaan motor induksi hanya bagian mekanik saja, dan konstruksinya yang sederhana motor induksi sangat handal dan jarang sekali rusak secara elektrik. Bagian motor induksi yang perlu dipelihara rutin adalah pelumasan *bearing*, dan pemeriksaan kekencangan baut-baut kabel pada terminal box karena kendur atau bahkan lepas akibat pengaruh getaran secara terus menerus.³

³ Siswoyo, Teknik Listrik Industri (Jakarta :Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jendral Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), hlm. 5-7.

2.4.1 Stator

Pada bagian stator terdapat beberapa slot yang merupakan tempat kawat (konduktor) dari tiga kumparan yang masing – masing berbeda fasa dan menerima arus dari tiap fasa tersebut yang disebut kumparan stator. Stator terdiri dari plat – plat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi.



Gambar 2.3 Stator

(Sumber : Buku *Basic Eletrical Engineering*, 2009.)

Jika kumparan stator mendapatkan suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan timbul flux magnet putar. Karena adanya *flux* magnet putar pada kumparan stator, mengakibatkan rotor berputar karena adanya induksi magnet dengan kecepatan putar rotor sinkron dengan kecepatan putar stator.⁴

$$N_s = \frac{120 f}{p} \quad (2.1)$$

Dimana : N_s = Kecepatan Sinkron (rpm)

f = Besarnya Frekuensi (Hz)

P = Jumlah Kutub

⁴ Drs. Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, (Yogyakarta: Andi, 2004), hlm. 311.



stator mempunyai bagian-bagian :

1. Gandar atau Bodi Motor, digunakan sebagai bagian dari tempat mengalirnya fluks magnet yang dihasilkan kutub – kutub magnet, karena itu beban motor dibuat dari bahan ferromagnetik. Disamping itu badan motor ini berfungsi untuk meletakkan alat – alat tertentu dan melindungi bagian – bagian mesin lainnya. Biasanya pada motor terdapat papan nama atau *name plate* yang bertuliskan spesifikasi umum dari motor.
2. Inti Kutub magnet dan lilitan penguat magnet, Sebagaimana diketahui bahwa fluks magnet yang terdapat pada motor arus searah dihasilkan oleh kutub magnet buatan yang dibuat dengan prinsip elektromagnetis. Lilitan penguat magnet berfungsi untuk mengalirkan arus listrik agar terjadi proses elektromagnetis.
3. Sikat-sikat dan pemegang sikat, digunakan sebagai jembatan bagi aliran arus dari sumber. Disamping itu sikat memegang peranan penting untuk terjadinya komutasi yaitu gesekan antara sikat dan komutator dan biasanya terbuat dari bahan arang. Bagian puncak sikat diberi pelat tembaga guna mendapatkan kontak yang baik antara sikat dan dinding pemegang sikat. Gagang sikat (pemegang sikat) berguna untuk menimbulkan tekanan yang diperlukan antara sikat. Ketiadaan bunga api pada komutator banyak tergantung pada mulur dari perakitan dan pemasangan gagang sikat. Tiap-tiap gagang sikat dilengkapi dengan suatu pegas yang menekan pada sikat melalui suatu sistem tertentu sehingga sikat tidak terjepit.



2.4.2 Rotor (bagian motor yang bergerak)

Berdasarkan hukum *faraday* tentang induksi magnet, maka medan putar yang secara relatif merupakan medan magnet yang bergerak terhadap penghantar rotor akan menginduksikan gaya gerak listrik (ggl). Frekuensi ggl induksi ini sama dengan frekuensi jala-jala.

Besar ggl induksi ini berbanding lurus dengan kecepatan relatif antara medan putar dan penghantar rotor. Penghantar – penghantar dalam rotor yang membentuk suatu rangkaian tertutup, merupakan rangkaian laju arus rotor dan searah dengan hukum yang berlaku yaitu hukum *lenz*. Arahnya melawan fluksi yang menginduksi, Dalam hal ini arus rotor itu ditimbulkan karena adanya perbedaan kecepatan yang berada diantara fluksi atau medan putar stator dengan penghantar yang diam. Rotor akan berputar dalam arah yang sama dengan arah medan putar stator untuk mengurangi beda kecepatan.

Bagian rotor yang merupakan tempat kumparan rotor adalah bagian yang bergerak atau berputar. Rotor terbuat dari material yang sama dengan stator. Lapisan dengan inti berbentuk silinder dipasang langsung pada porosnya. Ada dua tipe rotor pada motor induksi :

- a. Sangkar tupai atau rotor sangkar sederhana
- b. Rotor belitan atau rotor *slip ring*

Dari bagian motor yang bergerak (rotor) ada beberapa hal yang perlu diketahui antara lain :

1. Komutator, berfungsi sebagai penyearah mekanik yang bersama-sama dengan sikat membuat suatu kerja sama yang disebut komutasi. Supaya menghasilkan penyearah yang lebih baik, maka komutator yang digunakan hendaknya dengan jumlah yang besar. Setiap belahan (segmen) komutator berbentuk lempengan. Disamping itu, komutator juga berfungsi untuk mengumpulkan GGL induksi yang terbentuk pada sisi-sisi kumparan. Oleh karena itu

komutator dibuat dari bahan konduktor. Dalam hal ini digunakan dari campuran tembaga.

2. Isolator. Isolator yang digunakan terletak antara komutator-komutator dan komutator-komutator poros menentukan kelas dari motor berdasarkan kemampuan terhadap suhu yang timbul dari mesin tersebut. Jadi disamping sebagai isolator terhadap listrik pada panas tertentu pada listrik, maka isolator digunakan harus mampu terhadap panas tertentu.

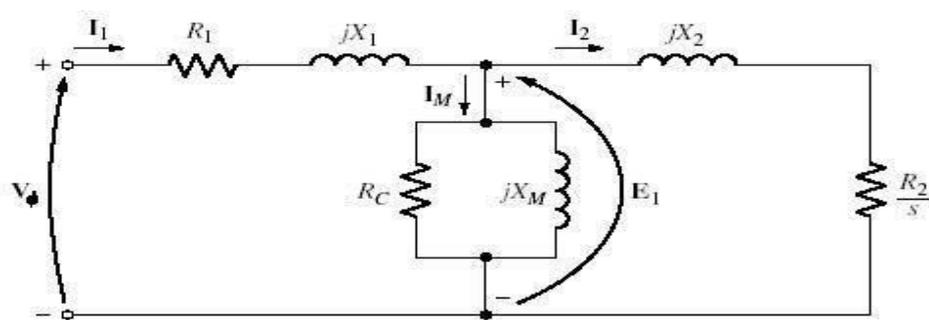
Berdasarkan jenis isolator yang digunakan, dari kemampuan ini dikenal berapa macam kelas, antara lain :

- a. Kelas A : katun, sutra alam, sutra buatan, dan kertas.
- b. Kelas B : serat asbes, serat gelas.

2.5 Rangkaian Ekuivalen

Motor induksi 3-fasa ini dapat dianalisa berdasarkan rangkaian ekuivalen motor tanpa harus mengoperasikan motor.

Dari rangkaian ekuivalen (Gambar 2.4) dibawah ini I_1 merupakan arus yang mengalir pada kumparan stator yang terbagi arus I_m dan I_2 , dimana untuk mencari besarnya arus yang mengalir pada saat pembebanan.⁵



Gambar 2.4 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fasa
(Sumber : Jurnal Analisis Perbandingan Sistem pengasutan Motor Induksi 3 fasa sebagai penggerak pompa pada perusahaan daerah air minum (PDAM) Wendit Malang, 2012).

⁵ Andyk Probo Prasetya dkk. Analisis Perbandingan Sistem Pengasutan Motor Induksi 3 Fasa Sebagai Penggerak Pompa Pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Wendit Malang. (Malang: Institute Teknologi Nasional Malang, 2012), hlm. 225.

- V_ϕ = Tegangan sumber perfasa pada kumparan stator
 R_1 = Resistansi kumparan stator
 jX_1 = Reaktansi Induktif kumparan stator
 R_c = Tahanan Inti Besi
 R_2 = Resistansi kumparan rotor dilihat dari sisi stator
 jX_2 = Reaktansi Induktir rotor dilihat dari sisi stator
 jX_m = Reaktansi magnet pada Motor
 I_1 = Arus kumparan stator
 I_2 = Arus pada kumparan rotor dilihat dari sisi stator saat motor distart

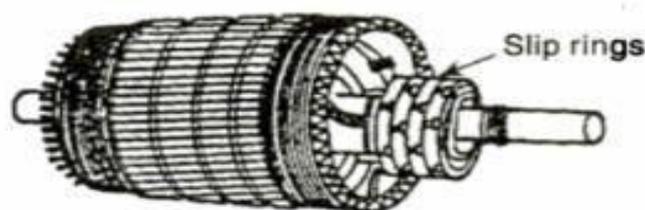
2.6 Klasifikasi motor induksi 3 fasa

Berdasarkan bentuk rotornya, motor induksi tiga fasa dibagi menjadi:

2.6.1 Rotor Belitan

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan belitan kumparan tiga fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama. Penambahan tahanan luar sampai harga tertentu, dapat membuat kopel mula mencapai harga kopel maksimumnya.

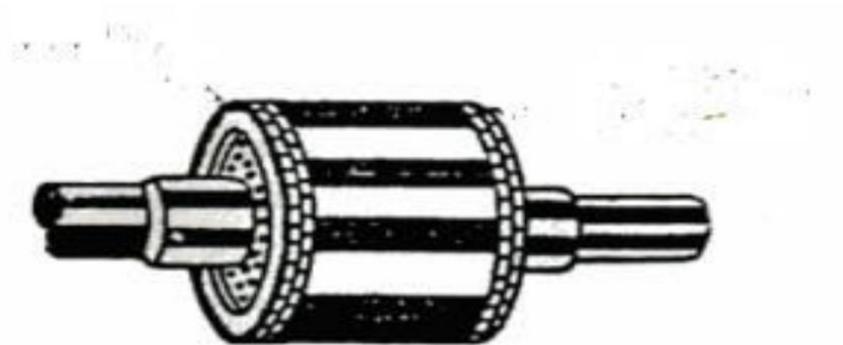
Motor induksi dengan rotor belitan memungkinkan penambahan (pengaturan) tahanan luar. Tahanan luar yang dapat diatur ini dihubungkan ke rotor melalui cincin. Selain untuk menghasilkan kopel mula yang besar, tahanan luar tadi diperlukan untuk membatasi arus mula yang besar pada saat *start*. Disamping itu dengan mengubah-ubah tahanan luar, kecepatan motor dapat diatur.



Gambar 2.5 Rotor Belitan atau Rotor Slip Ring
(Sumber: Buku Basic Electrical Engineering, 2009)

2.6.2 Motor rotor sangkar

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa hingga menyerupai sangkar tupai. Konstruksi rotor seperti ini sangat sederhana bila dibandingkan dengan rotor mesin listrik lainnya. Harganya pun murah, karena konstruksinya yang demikian, maka tidak mungkin diberikan pengaturan tahanan luar seperti pada motor induksi dengan rotor belitan.⁶



Gambar 2.6 Rotor sangkar tupai
(Sumber: Buku Teknik Listrik Industri Jilid II, 2008)

⁶ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, (Bandung: Penerbit ITB, 1991), hlm. 82-83.



Motor rotor sangkar konstruksinya sangat sederhana, yang mana rotor dari motor sangkar adalah onstruksi dari inti berlapis dengan konduktor dipasangkan parallel, atau kira-kira parallel dengan poros yang mengelilingi permukaan inti.

Konduktornya tidak terisolasi dari inti, karena arus rotor secara alamiah akan mengalir melalui tahanan yang paling kecil konduktor rotor. Pada setiap ujung rotor, konduktor rotor semuanya dihubung singkatkan dengan cincin ujung. Batang rotor dan cincin ujung sangkar yang lebih kecil adalah coran tembaga atau alumunium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan kedalam alur kemudian dilas dan ditempatkan parallel terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung magnetik sewaktu motor sedang jalan.

Berdasarkan karakteristik kelasnya motor induksi 3 fasa dibagi menjadi :

1. Kelas A

Motor Induksi 3 fasa kelas A memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Torsi awal normal (150 – 170%) dari nilai ratingnya) dan torsi *breakdown* nya tinggi
- Arus awal relatif tinggi dan Slip rendah ($0.0015 < Slip < 0.005$)
- Tahanan rotor kecil sehingga efisiensi tinggi
- Baik digunakan untuk torsi beban kecil saat *start* dan cepat mencapai putaran penuhnya
- Contoh : pompa dan *fan*

2. Kelas B

Motor Induksi 3 fasa kelas B memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Torsi awal normal hampir sama seperti kelas A
- Arus awal rendah (lebih rendah 75% dari kelas A) dan *Slip* rendah ($slip < 0.005$)



- Arus awal dapat diturunkan karena rotor mempunyai reaktansi tinggi
- Rotor terbuat dari plat atau saklar ganda
- Efisiensi dan faktor dayanya pada saat berbeban penuh tinggi
- Contoh : *fan, blower, dan motor generator set*

3. Kelas C

Motor Induksi 3 fasa kelas C memiliki karakteristik sebagai berikut:

- Torsi awal lebih tinggi (200 % dari nilai ratingnya)
- Arus awal rendah dan Slip rendah ($slip < 0.005$)
- Reaktansi rotor lebih tinggi dari kelas B
- Saat beban penuh slip cukup tinggi sehingga efisiensinya rendah (lebih rendah dari kelas A dan Kelas B)
- Contoh : Kompresor, *Konveyor, dan fort*

4. Kelas D

Motor Induksi 3 fasa kelas D memiliki karakteristik sebagai berikut

- Torsi awal yang paling tinggi dari kelas lainnya
- Arus awal rendah dan Slip tinggi
- Motor ini cocok untuk aplikasi dengan perubahan beban dan perubahan kecepatan secara mendadak pada motor
- Ketika torsi maksimum slip mencapai harga 0.5 atau lebih, sedangkan ketika beban penuh slip antara 8% hingga 15% sehingga efisiensinya rendah
- Contoh : *elevator, crane.*

2.7 Prinsip kerja motor induksi 3 fasa

Perputaran motor pada mesin arus bolak – balik ditimbulkan oleh adanya medan putar (*fluks* yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya.



Medan putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa banyak umumnya fasa 3. hubungan dapat berupa hubungan bintang atau delta.

Ada beberapa prinsip kerja motor induksi:⁷

1. Apabila sumber tegangan 3 fasa dipasang pada kumparan medan (stator), timbullah medan putar dengan kecepatan (rpm) dengan f_s = frekuensi stator (*Stator line frequency*) atau frekuensi jala-jala dan p = jumlah kutub pada motor.
2. Medan stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor.
3. Akibatnya pada kumparan jangkar (rotor) timbul tegangan induksi (ggl).
4. Karena kumparan jangkar merupakan kumparan tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
5. Adanya arus (I) didalam medan magnet menimbulkan gaya (F) pada rotor.
6. Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor besar akan memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
7. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan stator dengan kecepatan berputar rotor (n_r).
8. Perbedaan kecepatan disebut slip (S) dinyatakan dengan :

$$S = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \times 100 \% \quad (2.2)$$

Dimana : s : slip (%)

N_s : Kecepatan Putaran Stator (rpm)

N_r : Kecepatan putaran rotor (rpm)

⁷ Zuhail, Dasar Tenaga Listrik, (Bandung: Penerbit ITB, 1991), hlm. 105.



Karena $N_r \neq N_s$, maka motor induksi disebut pula sebagai motor tak serempak (asinkron).

Harga slip motor induksi bervariasi bergantung dari perubahan kecepatan putarnya. Pada saat *start*, putaran rotor (N_r) = 0 rpm, sehingga didapat :

$$s = \frac{(N_s - 0)}{N_s} \times 100 \% = 100 \%$$

pada saat sinkron, $N_s = N_s$:

$$s = \frac{(N_s - N_s)}{N_s} \times 100 \% = 0 \% \text{ (motor dalam keadaan diam)}$$

Jadi harga slip motor induksi adalah $100 \% \geq s \geq 0\%$.

9. Bila $N_r = N_s$, tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor akan ditimbulkan apabila lebih kecil.
10. Dilihat dari cara kerjanya, motor induksi disebut juga sebagai motor tak serempak atau asinkron.

2.8 Daya pada motor induksi

Daya merupakan tenaga atau kemampuan dalam melakukan kerja yang dinyatakan dalam satuan Nm/s, Watt, ataupun Horse Power (HP).

2.8.1 Pengertian Daya

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus dan tegangan pada saat itu. Jika arus dan tegangan bolak-balik satu fasa , maka daya dalam satu periode sama dengan perkalian dari arus dan tegangan efektif. Tetapi jika ada reaktansi dalam rangkaian arus dan tegangan satu fasa sehingga selama siklusnya biasa terjadi arus negatif dan tegangan positif.

Secara teoritis daya terdiri dari tiga yaitu daya efektif, daya reaktif, dan daya semu yang pengertiannya adalah sebagai berikut :



- a. Daya aktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain adalah daya yang benar-benar terpakai yang dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah Watt (W).
- b. Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi. Daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif (X_L) dan reaktansi kapasitif (X_C), satuannya adalah Volt Ampere Reaktif (VAR).
- c. Daya semu (S) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan Volt Ampere (VA).

Daya memiliki hubungan dengan usaha yaitu daya merupakan usaha yang dilakukan dalam satuan waktu, atau dengan kata lain daya berbanding terbalik dengan waktu sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P = \frac{W}{T} \quad (2.3)$$

Dimana :

P = Daya (W)

W = Usaha (Joule)

T = Waktu (s)

2.8.2 Daya pada motor induksi

Daya pada motor listrik dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P_{1\theta} = V_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi \quad (2.4)$$

Untuk perhitungan 3θ :⁸

$$P_{3\theta} = 3 \cdot V_p \cdot I_p \cdot \cos \varphi \quad (2.5)$$

$$P_{3\theta} = 3 \cdot P_{1\theta}$$

⁸ Drs. Yon Rijono, Dasar Teknik Tenaga Listrik, (Yogyakarta: Andi, 2004), hlm. 343.



$$\text{Dimana } V_p = \frac{V_l}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

$$I_p = I_l \quad (2.7)$$

Sehingga :

$$P_{3\theta} = 3 \left(\frac{V_l}{\sqrt{3}} \cdot I_l \cdot \cos \varphi \right) \quad (2.8)$$

$$P_{3\theta} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \left(\frac{V_l}{\sqrt{3}} \cdot I_l \cdot \cos \varphi \right) \quad (2.9)$$

$$P_{3\theta} = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos \varphi \quad (2.10)$$

Keterangan:

$P_{1\theta}$ = Daya pada 1 fasa (Watt)

$P_{3\theta}$ = Daya pada 3 fasa (Watt)

V_p = Tegangan per-fasa (Volt)

V_l = Tegangan *line to line* (Volt)

I = Arus (Ampere)

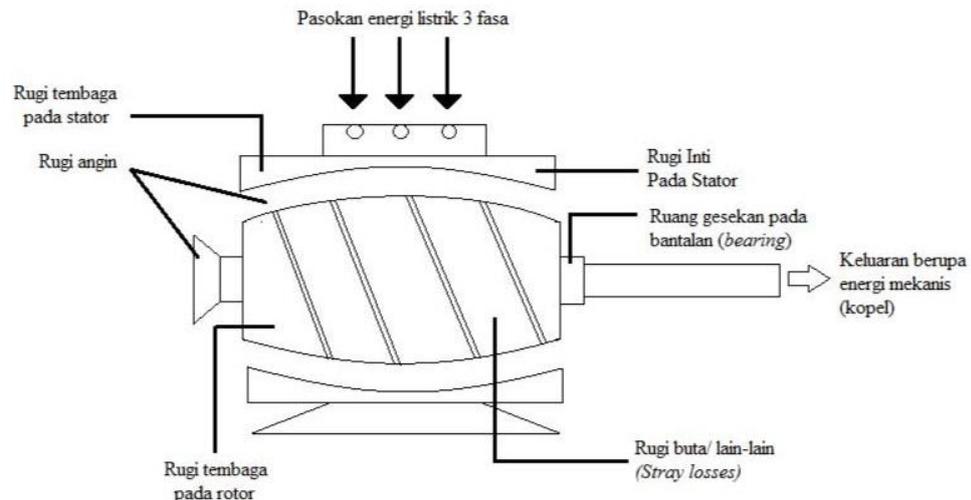
$\cos \theta$ = Faktor Daya

2.9 Rugi-rugi motor induksi⁹

Pada sebuah motor induksi terdapat beberapa rugi - rugi yang ditimbulkan karena komponen-komponen yang menyusun motor itu sendiri, seperti komponen tembaga yang terdapat pada gulungan stator dan rotor. Komponen-komponen tersebut akan menimbulkan rugi-rugi seperti rugi-rugi tembaga , rugi-rugi pada

⁹ Mochtar Wijaya, Dasar-dasar Mesin Listrik, (Jakarta: Djambatan,2001), hlm. 170-171.

inti besi , rugi-rugi mekanik seperti hambatan yang ditimbulkan karena gesekan dan angin.



Gambar 2.7 Rugi-rugi pada motor induksi
(Sumber : Diktat Mesin-mesin Listrik)

2.9.1 Rugi –rugi belitan atau rugi tembaga

Pada rugi - rugi tembaga, rugi - rugi yang ditimbulkan sebanding dengan nilai $I^2 \cdot R$, dimana I merupakan arus yang mengalir pada belitan tembaga dan R merupakan besarnya nilai tahanan tembaga tersebut. Sehingga semakin besar arus maka semakin besar rugi - rugi pada tembaga. Yang berarti semakin besar beban yang dikerjakan oleh sebuah motor, semakin besar arus yang mengalir dibelitan tembaga sehingga rugi - rugi tembaga pada motor tersebut akan menjadi besar.

Berikut persamaannya :

$$P_t = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (2.11)$$

Rugi dalam belitan sebenarnya tidak hanya tergantung pada arus, tetapi juga pada tahanan belitan dibawa kondisi operasi. Sedangkan tahanan efektif dari



belitan selalu berubah akibat perubahan *temperature*, *skin effect* dan lain sebagainya.

2.9.2 Rugi-rugi inti besi

Rugi-rugi inti diperoleh magnetis dalam stator dan rotor akibat timbulnya efek histerisis dan arus pusar (*Eddy Current*). Timbunya rugi-rugi inti ketika besi jangkar atau struktur rotor mengalami perubahan *fluks* terhadap waktu. Untuk rugi-rugi pada inti besi, rugi tersebut tidak terkait penuh dengan besar kecilnya beban yang diberikan pada motor. Faktor yang mempengaruhi besarnya rugi-rugi pada inti besi adalah *hysterisis* dan *eddy current* (arus eddy).

2.9.3 Rugi mekanik

Untuk rugi-rugi mekanik pada umumnya disebabkan oleh faktor mekanikal seperti hambatan dan gesekan, seperti pada bearing, udara dll. Total rugi-rugi yang dijelaskan diatas akan memperbesar daya listrik yang dibutuhkan untuk menggerakkan beban oleh sebuah motor.

Rugi mekanik dianggap konstan dari beban nol hingga beban penuh, Akan tetapi tidak sepenuhnya tepat seperti halnya rugi inti.

2.10 Efisiensi motor induksi¹⁰

Dalam sistem konversi energi elektro mekanik yakni dalam operasi motor-motor listrik terutama pada motor induksi, total daya yang diterima sama dengan daya yang diberikan, ditambah dengan kerugian daya yang terjadi seperti pada persamaan berikut:

$$P_{in} = P_{out} + \sum \text{rugi-rugi daya} \quad (2.12)$$

Dimana : P_{in} : Daya input motor (Watt)
 P_{out} : Daya output motor (Watt)

¹⁰ Mochtar Wijaya, Dasar-dasar Mesin Listrik, (Jakarta: Djembatan,2001), hlm. 172-173.



Efisiensi sebuah motor dinyatakan sebagai persentase perbandingan antara daya output yang dapat diberikan oleh sebuah motor untuk kerja (P_2) terhadap daya input (P_1) yang dibutuhkan oleh motor tersebut.

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \quad .(2.13)$$

Atau,

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{P_{in} - \Sigma \text{rugi-rugi daya}}{P_{in}} \times 100 \% \quad (2.14)$$

Dari persamaan di atas perlu diketahui faktor-faktor yang menyebabkan efisiensi selalu dibawah 100%. Berikut ini yang merupakan kerugian daya yang timbul selama motor beroperasi:

1. Belitan motor yang dinamakan rugi-rugi listrik (rugi belitan/tembaga).
2. Kerugian daya yang ditimbul langsung karena putaran motor:
 - Rugi-rugi mekanis akibat putaran
 - Rugi-rugi inti besi akibat kecepatan putaran dan *fluks* medan.

2.11 Pemilihan Motor

Sebelum menggunakan motor listrik untuk menggerakkan suatu beban, maka terlebih dahulu kita harus mengetahui karakteristik beban yang akan digerakkan tersebut, seperti:

1. Apakah beban akan terhubung langsung ke poros motor?
2. Berapa besar daya yang dibutuhkan?
3. Bagaimana hubungan torsi beban dengan kecepatan?
4. Berapa besar torsi asut, torsi kecepatan, dan torsi maksimum yang dibutuhkan?
5. Dimana motor akan diletakkan?



dan masih banyak lagi hal-hal yang harus dijadikan acuan sebelum kita memilih motor listrik, supaya motor dapat menggerakkan beban secara optimal dan efisien.¹¹

2.12 Pengaman Motor Induksi

Seperti halnya dengan mesin listrik yang lain, Motor induksi tidak lepas dari gangguan gangguan yang dapat merusaknya. Gangguan-gangguan itu dapat datang dari luar motor ataupun dari kondisi buruk motor itu sendiri. Pengaman pada motor induksi bertugas mencegah kerusakan motor bila terjadi gangguan yang sering terjadi pada motor induksi yaitu:

1. Gangguan arus lebih yang terdiri dari arus lebih hubung singkat dan arus beban lebih. Gangguan ini disebabkan oleh *overload* atau beban lebih.
2. Gangguan tegangan kurang atau salah satu fasa hilang, gangguan ini sangat berbahaya sekali karena arus akan naik dengan cepat yang pada akhirnya belitan motor akan terbakar bila tidak segera diatasi.
3. Gangguan dari komponen mekanis motor. Gangguan ini lebih bersifat pada gangguan *bearingnya*, *fan* pendingin dan lain-lain, jika dibiarkan dalam waktu yang lama akan sangat berbahaya bagi motor tersebut.

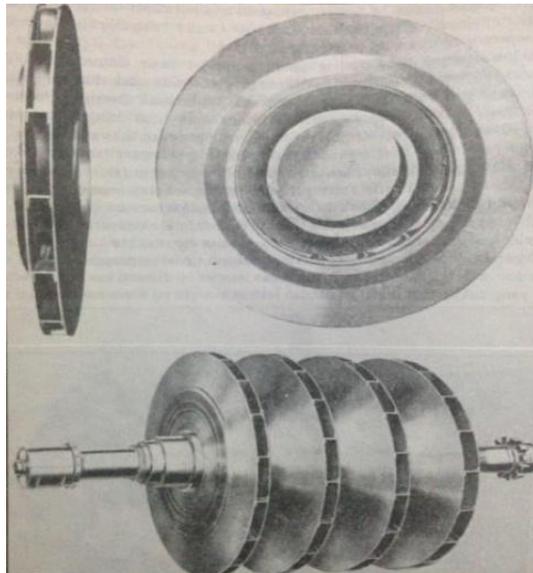
2.13 Fan dan Blower

Hampir kebanyakan pabrik menggunakan *fan* dan *blower* untuk ventilasi dan untuk proses industri yang memerlukan aliran udara. Sistem *fan* penting untuk menjaga pekerjaan proses industri yang terdiri dari sebuah *fan*, motor listrik, sistem penggerak, saluran atau pemipaan, peralatan pengendali aliran, dan

¹¹ Prih Sumardjati, dkk., *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3*, (Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jendral Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional, 2008), hlm. 425-426.

peralatan penyejuk udara (*filter*, kumparan pendingin, penukar panas, dan lain-lain).

Blower menurut definisi yang diberikan oleh *The Compressed Air Institute* adalah sebuah mesin yang menempatkan udara atau gas oleh daya sentrifugal ke tekanan akhir yang tidak melebihi 35 psig. Bila dipakai untuk keperluan khusus, blower terkadang diberi nama lain. Untuk keperluan gas biasa disebut dengan *exhauster*. Bila tekanan pada sisi hisap adalah diatas tekanan atmosfer, *blower* ini dikenal dengan nama *booster* atau *circulator*.¹²



Gambar 2.8 *Impler-impler blower* dengan sudut-sudut yang dibuat dari pelat yang dibentuk.

(Sumber : Buku Pompa dan *Blower* Sentrifugal, 1993)

Untuk banyak penggunaan penggerak yang bervariasi kecepatannya adalah yang lebih disukai. Bila digunakan motor listrik biasanya jenis sangkar atau serempak dan sering dihubungkan dengan *blower* oleh roda gigi pemercepat.

¹² Ir.Zulkifli Harahap, *Pompa dan Blower Sentrifugal*, (Jakarta: Penerbit Erlangga, 1993), hlm. 207.

Untuk mempercepat kecepatan yang bervariasi dapat dipakai *kopling* hidraulik atau *kopling* magnetis.¹³

2.14 Jenis Aliran *Fan* atau *Blower*¹⁴

Beberapa jenis aliran yang diciptakan dalam *fan* atau *blower* akan dipaparkan pada beberapa bagian berikut :

2.14.1 *Fan* Aliran Aksial

Fan aliran aksial dirancang untuk menangani laju alir yang sangat tinggi dan tekanan rendah. *Fan* jenis *disk* (piringan) adalah sama dengan *fan-fan* rumah tangga. *Fan* tersebut umumnya untuk sirkulasi atau pembuangan yang bekerja tanpa saluran.



Gambar 2.9 *Fan* Aksial

(Sumber: Jurnal Modifikasi Putaran *Fan* untuk meningkatkan efisiensi pemakaian listrik)

Fan jenis *propeler* dengan bilah yang dirancang secara aerodinamik dapat terdiri dari 2 tahap atau lebih. Pada tipe ini, udara masuk dalam arah aksial dan meninggalkan juga dalam arah aksial. *Fan* ini biasanya mempunyai baling-baling yang mengarahkan aliran masuk (*inlet guide vane*), yang diikuti dengan bilah putar, dan bilah statis.

¹³ Ir.Zulkifli Harahap, *Pompa dan Blower Sentrifugal*, (Jakarta: Penerbit Erlangga, 1993), hlm. 253.

¹⁴ Yogi Wibisono Budhi, *Modul Fan Sentrifugal*, ITB, hlm. 2-3.

2.14.2 Blower Sentrifugal

Blower sentrifugal terlihat lebih seperti pompa sentrifugal daripada *fan*. *Impellernya* digerakkan oleh *gird* yang berputar 15.000 rpm. Pada *blower* multi-tahap, udara dipercepat setiap melewati *impeler*. Pada *blower* tahap tunggal, udara tidak mengalami banyak belokan, sehingga lebih efisien.

Blower sentrifugal mengolah udara atau gas yang masuk dalam arah aksial dan keluar dalam arah radial. Tipe *blower* ini mempunyai 3 bilah : bilah radial atau lurus, bilah bengkol maju (*forward curved blade*), dan bilah bengkol mundur (*backward curved blade*).



Gambar 2.10 *Blower* Sentrifugal (*Fan Air Company*)
(Sumber: Jurnal Modifikasi Putaran *Fan* untuk meningkatkan efisiensi pemakaian listrik)

Blower bilah radial biasanya digunakan dalam aplikasi yang mempunyai temperature tinggi dan diameter yang besar. Bilah yang dalam arah radial mempunyai tegangan (*stress*) yang sangat rendah dibandingkan dengan bilah bengkol maju ataupun mundur. Rotor mempunyai 4-12 bilah dan biasanya beroperasi pada kecepatan rendah. *Blower* ini digunakan dalam kerja buangan

(*exhaust work*), khususnya untuk gas-gas pada temperatur tinggi dan dengan suspensi dalam alirannya.

a. *Forward-curved blade blower*

Blower ini mengalirkan gas buang pada kecepatan yang sangat tinggi. Tekanan yang dipasok oleh *blower* ini lebih rendah dibandingkan dengan tekanan yang dihasilkan oleh dua bilah yang lain. Banyaknya bilah dalam rotor tersebut dapat mencapai 50, sedangkan kecepatannya dapat mencapai 3600 rpm.



Gambar 2.11 *Forward-Curved Fan (Canadian Blower)*

(Sumber : Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia)

b. *Backward-curved blade blower*

Blower ini digunakan ketika dibutuhkan tekanan buang yang lebih tinggi. *Blower* ini digunakan pada berbagai aplikasi. *Blower* jenis *backward* dan *forward curved* mempunyai tegangan yang jauh lebih besar daripada *blower* radial. *Blower* sentrifugal menghasilkan energi dalam aliran udara (gas) melalui gaya sentrifugal dan memberikan sebuah kecepatan kecepatan pada udara (gas) tersebut. Bilah bengkol maju memberikan sebagian besar kecepatan kepada udara (gas). Ikal yang berbentuk gulungan (*scroll shaped volute*) mendifusikan udara dan

menciptakan kenaikan tekanan statik dengan cara penurunan kecepatan gas. Perubahan tekanan total (biasanya kecil) terjadi di dalam *impeller*. Tekanan statis meningkat, baik dalam *impeller* maupun bagian difusi.



Gambar 2.12 *Backward-curved blade blower*

(Sumber: Pedoman Efisiensi Energi untuk Industri di Asia)

12.15 Operasi Blower

Operasi blower adalah hampir sama dengan operasi pompa, waktu *menstart* atau *menstop* haruslah dicek – in terlebih dahulu untuk mengurangi beban penggerakannya. Tetapi hanya satu hal saja yang perlu diperhatikan selama pengoperasian, yakni pengecekan yang dilakukan sesekali terhadap temperatur dan jumlah oil atau dapat dilihat dari batas kerja / jam kerjanya.

12.16 Daya *Fan* dan *Blower*¹⁵

Efisiensi *fan* adalah perbandingan antara daya yang dipindahkan ke aliran udara dengan daya yang dikirimkan oleh motor ke *fan*.

¹⁵ yefri chan, “Cara Menghitung Daya Blower/Fan”, <https://yefrichan.wordpress.com/2010/08/02/cara-menghitung-daya-blowerfan>, hlm. 3-4.



Daya *fan* dan *blower* dinyatakan pada persamaan berikut:

$$P = \gamma \times Q \times H \quad (2.15)$$

Keterangan :

- P : Daya blower (Nm/s atau watt)
Q : Kapasitas udara (m³/s)
H : *Head* (meter)
 γ : Berat jenis Udara (kg/m².s² atau N/m³)

12.16.1 Berat Jenis Udara

Berat jenis gas termasuk udara dapat bervariasi tergantung temperaturnya. Karena itu untuk menyatakan berat jenis suatu gas harus diketahui temperaturnya. Berikut persamaannya:

$$\rho = \frac{273 \times 1,293}{273 + t \text{ } ^\circ\text{C}} \quad (2.16)$$

$$\gamma = \rho \times g \quad (2.17)$$

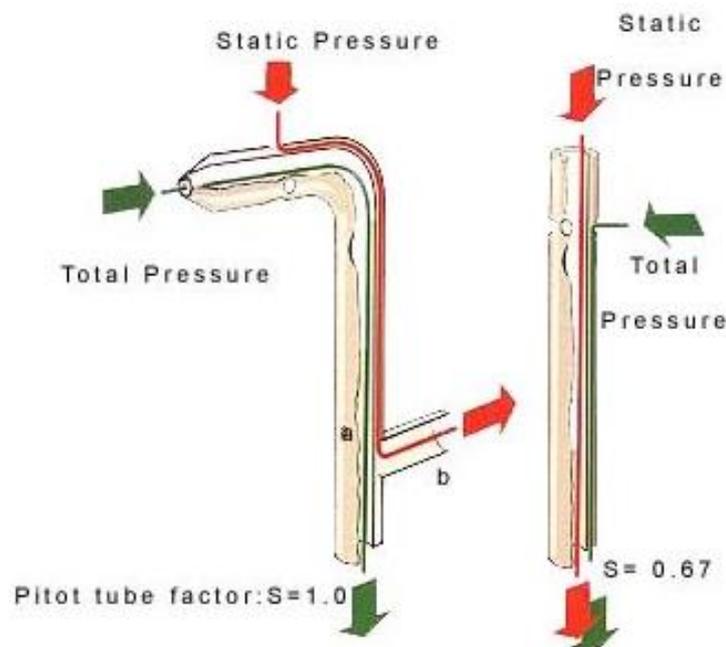
Dimana :

- t = suhu udara (°c)
 ρ = massa jenis udara (kg/m³)
 γ = Berat jenis udara (kg/m².s² atau N/m³)
g = gravitasi, 9,8 m/s²

12.16.2 Kecepatan Udara

Kecepatan udara dapat diukur dengan menggunakan sebuah tabung pitot dan manometer, atau dengan sensor aliran (instrumen tekanan diferensial), atau anemometer yang akurat.

Apabila tekanan kecepatan diukur dengan menggunakan sebuah tabung pitot dan manometer, tekanan total diukur dengan menggunakan pipa bagian dalam dari tabung pitot dan tekanan statis diukur dengan menggunakan pipa luar dari tabung pitot. Jika ujung tabung luar dan dalam disambungkan ke manometer, didapatkan tekanan kecepatan (yaitu perbedaan antara tekanan total dan tekanan statis).



Gambar 2.13 Pengukuran dengan tabung pitot

(Sumber: <https://yefrichan.wordpress.com/2010/08/02/cara-menghitung-daya-blowerfan/>)

Berikut persamaan untuk menghitung besar kecepatan aliran udara dengan menggunakan tabung pitot:

$$v \text{ (m/s)} = \frac{0,85 \sqrt{2 \times 9,81 \times \Delta h \times \gamma}}{\gamma \text{ udara}} \quad (2.18)$$

dimana :



C_p = Konstanta tabung pitot 0,85

Δh = Perbedaan tekanan rata-rata yang diukur oleh tabung pitot

γ_u = berat jenis udara pada kondisi pengujian

γ = berat jenis zat cair dalam manometer pada pitot

12.16.3 Kapasitas udara¹⁶

Perhitungan Kapasitas udara terlebih dahulu perlu diketahui diameter saluran untuk mencari luas penampang saluran (A). Barulah dapat dihitung Kapasitas udara/gas dalam saluran dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q \text{ (m}^3\text{/s)} = V \times A \quad (2.19)$$

dimana V adalah kecepatan aliran (m/s) dan A adalah luas penampang saluran (m^2). dimana dalam hal ini untuk menghitung luas penampang saluran menggunakan rumus luas lingkaran yaitu :

$$A = \pi \times r^2 \text{ atau } \pi \times \frac{D^2}{4} \quad (2.20)$$

dimana :

$$\pi = 3,14 \text{ atau } 22/7$$

r = Jari-jari blower atau setengah dari diameter *blower* (m)

D = Diameter *Blower* (m)

A = Luas permukaan (m^2)

¹⁶ yefri chan, "Cara Menghitung Daya Blower/Fan", <https://yefrichan.wordpress.com/2010/08/02/cara-menghitung-daya-blowerfan>, hlm. 2.



12.16.4 Head

Untuk menghitung *Head* (H) digunakan persamaan berikut:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (2.21)$$

Keterangan:

H = *Head* (meter)

ΔP = Total *Pressure* (N/m²)