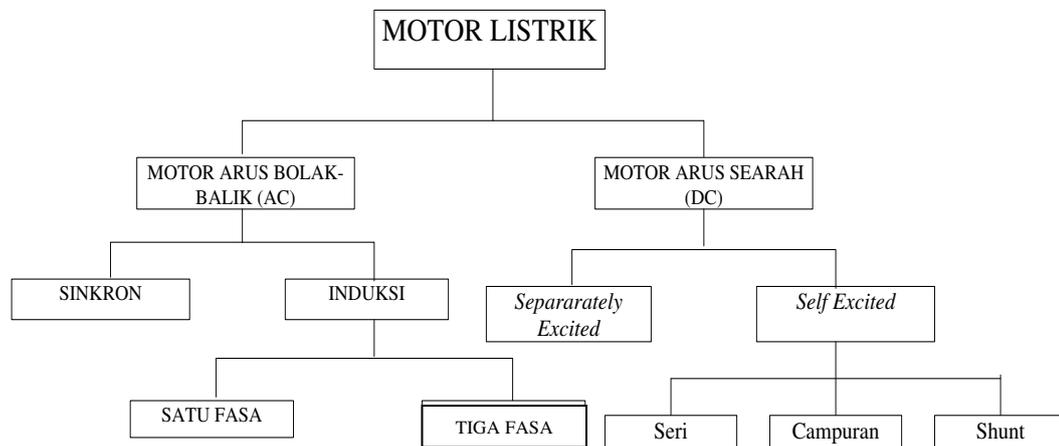


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Motor induksi<sup>1</sup>

Motor induksi merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Dari berbagai motor listrik yang ada, motor induksi merupakan jenis motor arus bolak-balik yang paling banyak digunakan. Hal ini disebabkan motor induksi memiliki konstruksi yang kuat dan karakteristik kerja yang baik.



Gambar 2.1 Klasifikasi motor listrik

Beberapa kelebihan dari motor induksi adalah :

1. Bentuknya sederhana, dengan konstruksi yang cukup kuat.
2. Biayanya murah dan dapat diandalkan.
3. Efisiensinya tinggi dan pada keadaan normal tidak memerlukan sikat, sehingga rugi-rugi gesekan (losis) dapat dikurangi.
4. Perawatan yang minimum.

Namun disamping itu, motor ini tetap memiliki kelemahan, di antaranya adalah :

1. Pengaturan kecepatannya berpengaruh pada efisiensinya.
2. Kecepatan akan berkurang jika bebannya bertambah.

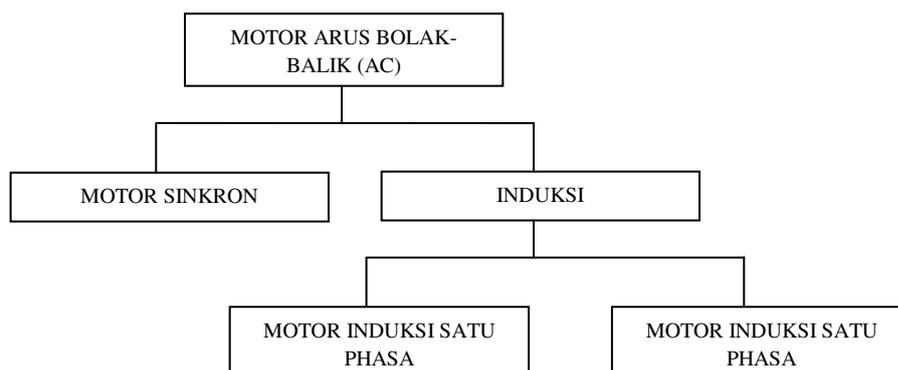
<sup>1</sup> Sumardjati, Prih. 2008. Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik Jilid 3. Hal : 408

3. Kopel mulanya lebih rendah daripada mesin arus searah paralel.

Disebut motor induksi, karena motor ini bekerja dengan adanya arus yang terinduksi sebagai akibat dari adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan magnet berputar yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi ini terdiri dari dua jenis, yaitu motor induksi dengan rotor belitan dan motor induksi rotor sangkar.

Motor induksi bekerja sebagai berikut : listrik dipasok ke stator yang akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet ini bergerak dengan kecepatan sinkron disekitar rotor. Arus rotor menghasilkan medan magnet kedua, yang berusaha untuk melawan medan magnet stator, yang menyebabkan rotor berputar. Walaupun begitu, didalam prakteknya motor tidak pernah bekerja pada kecepatan sinkron namun pada kecepatan dasar yang lebih rendah. Terjadinya perbedaan antara dua kecepatan tersebut disebabkan adanya slip/geseran yang meningkat dengan meningkatnya beban. Slip hanya terjadi pada motor induksi. Untuk menghindari slip dapat dipasang sebuah cincin geser/ slip ring, dan motor tersebut dinamakan motor cincin geser/slip ring motor.

### 2.1.1. Klasifikasi Motor AC



Gambar 2.2 Klasifikasi Motor AC

Motor listrik arus bolak-balik adalah jenis motor listrik yang beroperasi dengan sumber tegangan arus listrik bolak balik (AC, Alternating Current).



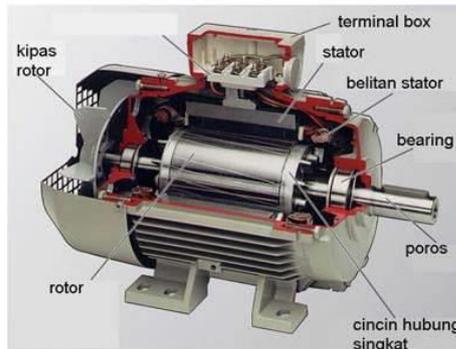
Motor listrik arus bolak-balik AC ini dapat dibedakan lagi berdasarkan sumber dayanya sebagai berikut.

**A. Motor sinkron**, adalah motor AC bekerja pada kecepatan tetap pada sistem frekuensi tertentu. Motor ini memerlukan arus searah (DC) untuk pembangkitan daya dan memiliki torque awal yang rendah, dan oleh karena itu motor sinkron cocok untuk penggunaan awal dengan beban rendah, seperti kompresor udara, perubahan frekuensi dan generator motor. Motor sinkron mampu untuk memperbaiki faktor daya sistem, sehingga sering digunakan pada sistem yang menggunakan banyak listrik.

**B. Motor induksi**, merupakan motor listrik AC yang bekerja berdasarkan induksi medan magnet antara rotor dan stator. Motor induksi dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok utama sebagai berikut :

- **Motor induksi satu fasa**. Motor ini hanya memiliki satu gulungan stator, beroperasi dengan pasokan daya satu fasa, memiliki sebuah rotor kandang tupai, dan memerlukan sebuah alat untuk menghidupkan motornya. Sejauh ini motor ini merupakan jenis motor yang paling umum digunakan dalam peralatan rumah tangga, seperti fan angin, mesin cuci dan pengering pakaian, dan untuk penggunaan hingga 3 sampai 4 Hp.
- **Motor induksi tiga fasa**. Medan magnet yang berputar dihasilkan oleh pasokan tiga fasa yang seimbang. Motor tersebut memiliki kemampuan daya yang tinggi, dapat memiliki kandang tupai atau gulungan rotor (walaupun 90% memiliki rotor kandang tupai); dan penyalaan sendiri. Diperkirakan bahwa sekitar 70% motor di industri menggunakan jenis ini, sebagai contoh, pompa, kompresor, belt conveyor, jaringan listrik, dan grinder. Tersedia dalam ukuran 1/3 hingga ratusan Hp.

### 2.1.2. Konstruksi Motor Induksi



Gambar 2.3 Konstruksi motor Induksi

Konstruksi motor induksi secara detail terdiri atas dua bagian, yaitu: bagian stator dan bagian rotor. Gambar 2.3 Stator adalah bagian motor yang diam terdiri : badan motor, inti stator, belitan stator, bearing dan terminal box. Bagian rotor adalah bagian motor yang berputar, terdiri atas rotor sangkar, poros rotor. Konstruksi motor induksi tidak ada bagian rotor yang bersentuhan dengan bagian stator, karena dalam motor induksi tidak komutator dan sikat arang.

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.

Rumus menghitung daya input motor induksi :

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \text{ (Watt)} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

- P<sub>1</sub> : Daya input (Watt)
- V : Tegangan (Volt)
- I : Arus (Amper)
- Cos : Faktor kerja

### 2.1.3. Jenis Motor Induksi 3 Fasa

Terdapat dua jenis motor induksi tiga fasa yang bekerja pada prinsip yang sama dan mempunyai konstruksi stator yang sama, namun mempunyai perbedaan konstruksi pada rotor. Berikut ini dua jenis motor induksi 3 fasa berdasarkan konstruksi rotor, antara lain;

#### 2.1.3.1. Motor Induksi Tiga Fasa Sangkar Tupai (*Squirrelcage Motor*)

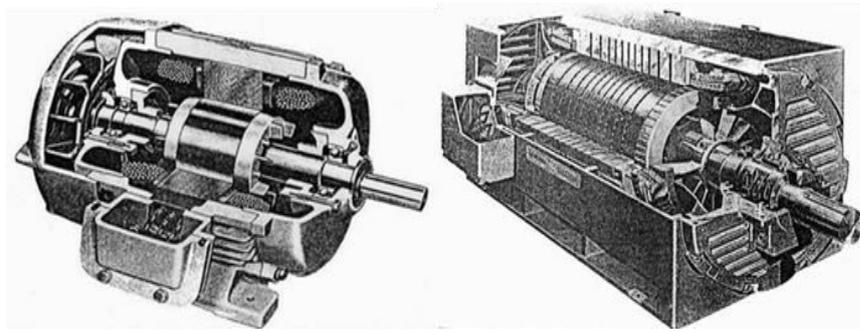
Penampang motor sangkar tupai memiliki konstruksi yang sederhana. Inti stator pada motor sangkar tupai tiga fasa terbuat dari lapisan-lapisan plat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau plat baja yang dipabrikasi. Lilitan-lilitan kumparan stator diletakkan dalam alur stator yang terpisah 120 derajat listrik. Lilitan fasa ini dapat tersambung dalam hubungan delta ( $\Delta$ ) ataupun bintang ( $Y$ ). Rotor jenis rotor sangkar ditunjukkan pada gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Rotor sangkar

Batang rotor dan cincin ujung motor sangkar tupai yang lebih kecil adalah coran tembaga atau aluminium dalam satu lempeng pada inti rotor. Dalam motor yang lebih besar, batang rotor tidak dicor melainkan dibenamkan ke dalam alur rotor dan kemudian dilas dengan kuat ke cincin ujung. Batang rotor motor sangkar tupai tidak selalu ditempatkan 10agnetic terhadap poros motor tetapi kerap kali dimiringkan. Hal ini akan menghasilkan torsi yang lebih seragam dan juga mengurangi derau dengung 10agnetic sewaktu motor sedang berputar. Pada ujung cincin penutup dilekatkan sirip yang berfungsi sebagai pendingin. Rotor jenis

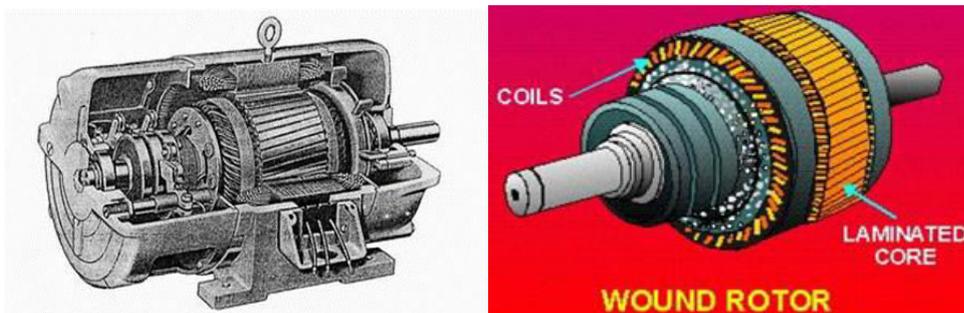
rotor sangkar standar tidak terisolasi, karena batangan membawa arus yang besar pada tegangan rendah. Motor induksi dengan rotor sangkar ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.5 Konstruksi motor induksi rotor sangkar

### 2.1.3.2. Motor Induksi Tiga Fasa Rotor Belitan (*Wound-Rotor Motor*)

Motor rotor belitan ( motor cincin seret ) berbeda dengan motor sangkar tupai dalam hal konstruksi rotornya. Seperti namanya, rotor dililit dengan lilitan terisolasi serupa dengan lilitan stator. Lilitan fasa rotor dihubungkan secara Y dan masing – masing fasa ujung terbuka yang dikeluarkan ke cincin slip yang terpasang pada poros rotor. Konstruksi motor tiga fasa rotor belitan ditunjukkan pada gambar di bawah ini;



Gambar 2.6 (a) Rotor belitan (b) Konstruksi motor induksi tiga phasa dengan rotor belitan



### 2.1.3.3 Jenis-jenis Motor Induksi 3 Fasa berdasarkan Karakteristik Kelasnya

#### a) 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 ( $0.0015 < \text{Slip} < 0.005$ )
- Tahanan rotor kecil sehingga efisiensi tinggi
- Baik digunakan untuk torsi beban kecil saat start dan cepat mencapai putaran penuhnya
- Contoh : pompa dan *fan*

#### b) 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 ( $\text{slip} < 0.005$ )
- 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

#### c) 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 ( $\text{slip} < 0.005$ )
- 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, *Conveyor*, *Crushers*

#### d) 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*

#### 2.1.4. Prinsip Kerja Motor Induksi<sup>2</sup>

Pada dasarnya ada beberapa prinsip penting pada motor-motor induksi yaitu :

- a. Apabila sumber tegangan tiga fasa di pasang pada kumparan stator timbulah medan putar dengan kecepatan.
- b. Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor
- c. Akibatnya pada kumparan rotor timbul ( ggl ) sebesar :  
$$E_2 = 4,44.f_2.N_2.m..... (2.2)$$
- d. Karena kumparan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, ggl (E) akan menghasilkan arus (I).
- e. Adanya arus didalam medan magnet menimbulkan gaya pada motor.
- f. Bila kopel mula dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator
- g. Tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator ( $n_s$ ) dengan kecepatan berputar rotor ( $n_r$ ).
- h. Perbedaan kecepatan antara  $n_r$  dan  $n_s$  disebut slip (s) dinyatakan dengan :

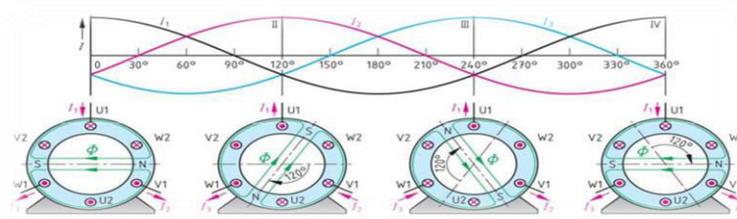
---

<sup>3</sup> Zuhail. 1991. Dasar Tenaga Listrik. ITB, Bandung. Hal : 68

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \dots\dots\dots(2.3)$$

- i. 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  $n_r$  lebih kecil dari  $n_s$ .
- j. Dilihat dari cara kerjanya maka motor tak serempak disebut juga motor induksi atau motor asinkron.

Prinsip kerja motor induksi ini juga dapat dijelaskan dengan gelombang sinusoidal seperti pada gambar 2.7, terbentuknya medan putar pada stator motor induksi. Tampak stator dengan dua kutub, dapat diterangkan dengan empat kondisi



Gambar 2.7 Bentuk gelombang dan timbulnya medan putar pada Stator motor induksi<sup>3</sup>

1. Saat sudut  $0^0$ . Arus  $I_1$  bernilai positif sedangkan arus  $I_2$  dan arus  $I_3$  bernilai negatif dalam hal ini belitan  $V_2, U_1$  dan  $W_2$  bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan belitan  $V_1, U_2$  dan  $W_1$  bertanda titik (arus listrik menuju pembaca). terbentuk fluk magnet pada garis horizontal sudut  $0^0$  kutub S (south=selatan) dan kutub N (north=utara).
2. Saat sudut  $120^0$ . Arus  $I_2$  bernilai positif sedangkan arus  $I_1$  dan arus  $I_3$  bernilai negatif, dalam hal ini belitan  $W_2, V_1$  dan  $U_2$  bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat  $W_1, V_2$  dan  $U_1$  bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser  $120^0$  dari posisi awal.

<sup>3</sup> Siswoyo.2008.Teknik Listrik Industri Jilid 2.Direktorat Jendral Manajemen Pembinaan SMK. Hal:55



3. Saat sudut  $240^0$ . Arus  $I_3$  bernilai positif dan  $I_1$  dan  $I_2$  bernilai negatif, belitan  $U_2$ ,  $W_1$ , dan  $V_2$  bertanda silang (arus meninggalkan pembaca), dan kawat  $U_1$ ,  $W_2$  dan  $V_1$  bertanda titik (arus menuju pembaca). Garis fluk magnet kutub S dan N bergeser  $120^0$  dari posisi kedua.
4. Saat sudut  $360^0$ . Posisi ini sama dengan saat sudut  $0^0$ . Dimana kutub S dan N kembali keposisi awal sekali. Dari keempat kondisi diatas saat sudut  $0^0$ ;  $120^0$ ;  $240^0$ ;  $360^0$ , dapat dijelaskan terbentuknya medan putar pada stator, medan magnet putar stator akan memotong belitan rotor. Kecepatan medan putar stator ini sering disebut kecepatan sinkron, tidak dapat diamati dengan alat ukur tetapi dapat dihitung secara teoritis yaitu dengan menggunakan rumus :

$$n_s = \frac{f \times 120}{p} = \text{RPM} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

$n_s$  = Kecepatan putaran medan stator (Rpm)

$f$  = Frekuensi jala-jala (Hz)

120 = Konstanta

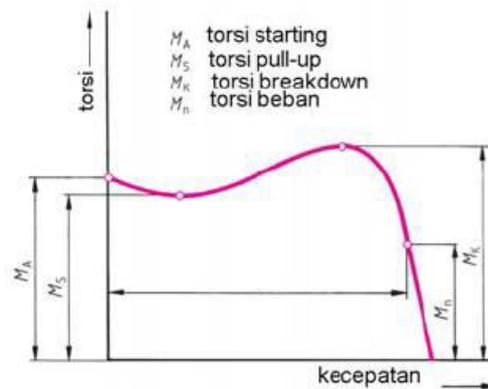
$P$  = Jumlah kutub pada motor (pole)

### 2.1.5. Karakteristik Motor Induksi

Karakteristik torsi motor induksi Gambar 2.9, disebut torsi fungsi dari slip  $T=f(\text{slip})$ . Garis vertikal merupakan parameter torsi (0–100%) dan garis horizontal parameter slip (1,0–0,0).

Dikenal ada empat jenis torsi, yaitu :

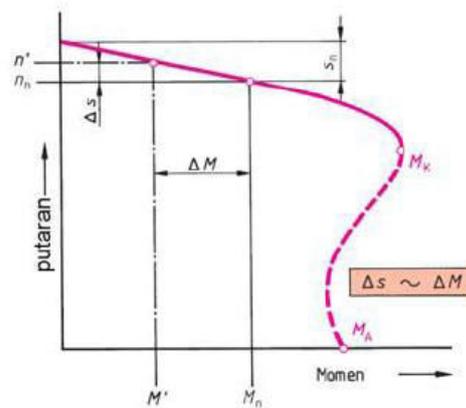
1.  $MA$ , momen torsi awal,
2.  $MS$ , momen torsi pull-up,
3.  $MK$ , momen torsi maksimum
4.  $MB$ , momen torsi kerja.



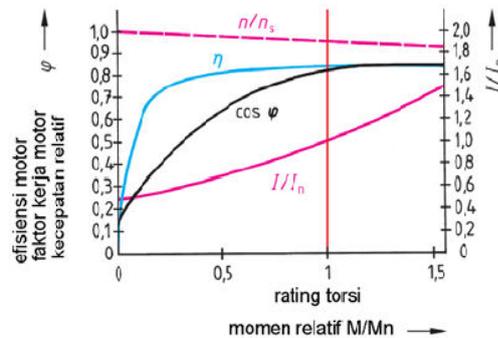
Gambar.2.8 Karakteristik Torsi Motor Induksi

Torsi awal terjadi saat motor pertama dijalankan (slip 1,0), torsi pull-up terjadi saat slip 0,7, torsi maksimum terjadi slip 0,2 dan torsi kerja berada ketika slip 0,05. Torsi beban harus lebih kecil dari torsi motor. Bila torsi beban lebih besar dari torsi motor, akibatnya motor dalam kondisi kelebihan beban dan berakibat belitan stator terbakar. Untuk mengatasi kondisi beban lebih dalam rangkaian kontrol dilengkapi dengan pengaman beban lebih disebut thermal overload, yang dipasang dengan kontaktor.

Karakteristik torsi juga bisa disajikan dalam bentuk lain, kita kenal karakteristik putaran = fungsi torsi,  $n = f(\text{torsi})$  lihat gambar.2.10. Garis vertikal menunjukkan parameter putaran, garis horizontal menunjukkan parameter torsi. Ketika motor berputar pada garis  $n'$  didapatkan torsi di titik  $M'$ . Ketika putaran berada di  $nn$  didapatkan torsi motor di  $Mn$ . Daerah kerja putaran motor induksi berada pada area  $n'$  dan  $nn$  sehingga torsi kerja motor induksi juga berada pada area  $M'$  dan  $Mn$ . Berdasarkan grafik  $n = f(\text{torsi})$  dapat juga disimpulkan ketika putaran rotor turun dari  $n'$  ke  $nn$  pada torsi justru terjadi peningkatan dari  $M'$  ke  $Mn$ .



Gambar.2.9 Karakteristik Putaran Fungsi Torsi Beban.



Gambar.2.10 Karakteristik Parameter Efisiensi,Putaran,Faktor Kerja dan Arus Beban

Karakteristik motor induksi lainnya lihat gambar-2.11. mencakup parameter efisiensi, faktor kerja, ratio arus dan ratio putaran. Dengan membaca karakteristik motor induksi dapat diketahui setiap parameter yang dibutuhkan. Saat torsi mencapai 100% dapat dibaca ratio arus  $I/I_0 = 1$ ; faktor kerja  $\cos \phi: 0,8$ , efisiensi motor  $0,85$  dan ratio putaran  $n/n_s : 0,92$ .

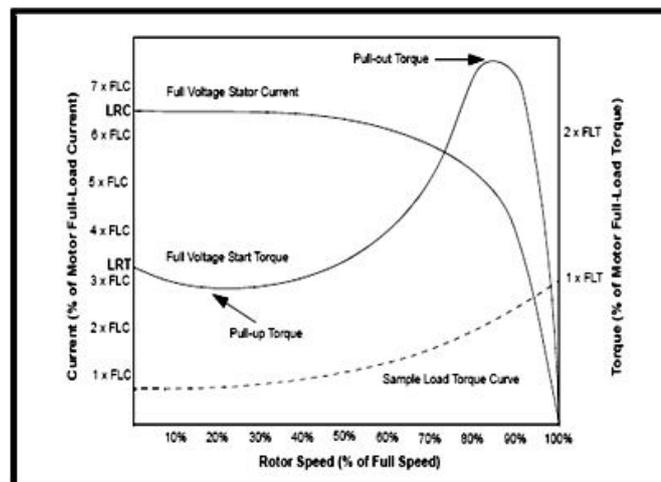
### 2.1.6. Karakteristik Arus Starting pada Motor Induksi

Saat motor induksi dijalankan maka akan membutuhkan arus mula yang besar, hal ini dikarenakan frekuensi dan reaktansi yang tinggi dalam kondisi start yaitu dengan slip seratus persen. Jadi dalam rangkaian rotor yang

sangat reaktif, arus rotor tertinggal terhadap ggl rotor dengan sudut yang besar. Hal ini berarti bahwa aliran arus maksimum terjadi dalam konduktor rotor pada suatu waktu setelah kerapatan fluksi maksimum stator melewati konduktor tersebut. Sehingga kondisi ini menghasilkan arus mula yang besar dengan factor daya yang rendah dan menghasilkan torsi mula yang rendah.

Jika rotor melakukan percepatan, frekuensi rotor menjadi berkurang dikarenakan nilai slip yang berkurang, hal ini berarti nilai reaktansi rotornya berkurang sehingga menyebabkan nilai torsinya naik ke harga maksimumnya. Jika motor mempercepat lebih lanjut, torsi akan turun sesuai dengan harga yang diperlukan untuk memutar beban dengan kecepatan konstan.

Karakteristik besarnya arus mula pada sebuah motor induksi bias di jelaskan dengan melihat gambar 2.11 di bawah ini



Gambar 2.11 Karakteristik arus start pada motor induksi

Dari gambar di atas dapat di jelaskan bahwa saat kondisi start motor listrik memerlukan arus yang besar, hal ini berlangsung untuk beberapa lama. Kemudian arus yang dibutuhkan akan turun pada kondisi locked rotor. Nilai arus yang dibutuhkan akan tetap saat kondisi beban normal.



Persamaan berikut dapat digunakan untuk menentukan besar daya yang diperlukan untuk start motor :

$$P_{start} = S_{rated} \times \text{Letter Code Factor} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

$P_{start}$  = Daya yang diperlukan untuk start motor (KVA)

$S_{rated}$  = Daya nominal motor (Hp)

Letter Code Factor = Faktor pengali (KVA/Hp)

Berdasarkan jenis motor induksi yang dapat dilihat dalam tabel berikut.

Berdasarkan NEMA Letter Code

Tabel 2.1 Jenis Motor Induksi berdasarkan NEMA Letter Code

Huruf	Faktor Pengali (Kva/Hp)
A	0-3,15
B	3,15-3,55
C	3,55-4,00
D	4,00-4,50
E	4,50-5,00
F	5,00-5,60

$$I_{start} = \frac{P_{start}}{\sqrt{3} V_{nominal}} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

$I_{start}$  = Arus starting motor (Ampere)

$V_{nominal}$  = Tegangan nominal motor (Volt)

Prosedur perhitungan jatuh tegangan pada motor saat starting motor adalah dengan menghitung impedansi antara motor sampai pada titik dimana tegangan dapat diasumsikan konstan. Impedansi suatu motor dapat



ditentukan dari katalog pabrikasinya, yang biasanya memberikan data arus beban penuh dan arus block rotor.

Persamaan yang dapat dipakai untuk menentukan tegangan motor pada saat starting adalah :

Dimana :

$$V_s = \frac{Z_m \times V_t}{\sqrt{(R_m+R_s)^2 + \sqrt{(X_m+X_s)^2}}} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

$V_t$  = tegangan nominal motor

$Z_m$  = impedansi motor

$$R_m = Z_m \cdot \cos\phi_m \dots\dots\dots(2.8)$$

$$X_m = Z_m \cdot \sin\phi_m \dots\dots\dots(2.9)$$

$\cos\phi_m$  = power faktor motor

$R_s$  = Resistansi total antara motor sampai pada titik dimana tegangan dapat diasumsikan konstan

$X_s$  = Reaktansi total antara motor sampai pada titik dimana tegangan diasumsikan konstan

Semua impedansi dinyatakan dalam satuan ohm, persen atau satuan perunit dengan base yang telah ditentukan. Jika drop tegangan dihitung dengan mengabaikan resistansi rangkaian dan hanya memperhitungan reaktansi rangkaian, maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi :

$$V_s = \frac{Z_m}{Z_m+X_s} \times V_t \dots\dots\dots(2.10)$$

Impedansi motor dapat dihitung dengan persamaan :

$$Z_m = \frac{V_m}{\sqrt{3} \cdot I_s} \dots\dots\dots(2.11)$$

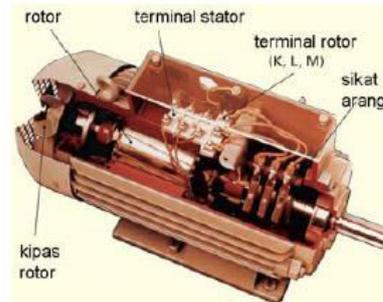
Dimana :

$V_m$  = tegangan rating motor (Volt)

$I_s$  = arus start pada tegangan rated motor (Ampere)

## 2.2. Motor Cincin Seret (*Slip Ring*)

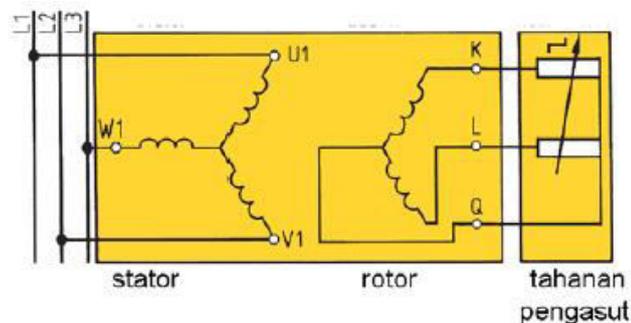
Motor Cincin Seret (*slip ring*) Gambar 2.12 atau sering disebut motor rotor lilit / cincin seret, termasuk motor induksi 3 fasa dengan rotor belitan dan dilengkapi dengan rotor lilit yang dihubungkan dengan sikat arang ke terminal. Motor Cincin Seret (*slip ring*) dirancang untuk daya besar.



Gambar 2.12 Bentuk Fisik Motor Induksi Rotor Cincin Seret (*Slip Ring*)

Motor cincin seret (*slip ring*) pada terminal box memiliki sembilan terminal, enam terminal terhubung dengan tiga belitan stator masing-masing ujungnya ( $U1-U2$ ,  $V1-V2$  dan  $W1-W2$ ), tiga terminal ( $K-L-M$ ) terhubung ke belitan rotor melalui cincin seret (*slip ring*).

Pengasutan rotor lilit Gambar. 2.13 belitan rotor yang ujungnya terminal  $K-L-M$  dihubungkan dengan resistor luar yang besarnya bisa diatur. Dengan mengatur resistor luar berarti mengatur besarnya resistor total yang merupakan jumlah resistansi rotor dan resistansi luar ( $R_{rotor} + R_{luar}$ ), sehingga arus rotor  $I_2$  dapat diatur.



Gambar 2.13 Belitan Stator dan Rotor Motor Cincin seret (*slip ring*) Berikut Resistor pada Rangkaian Rotor .

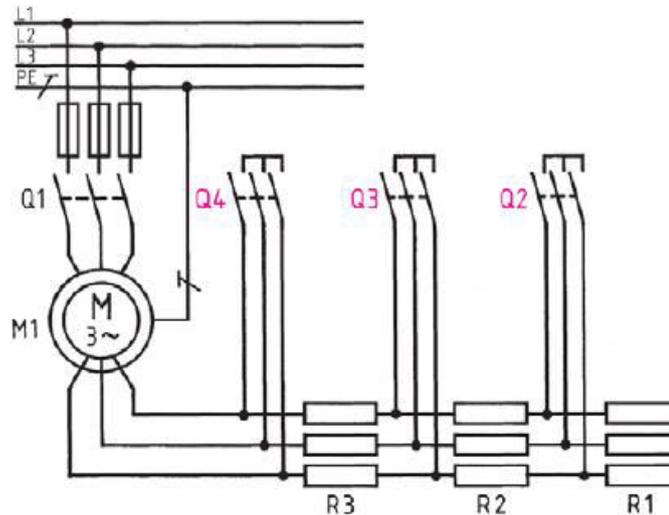
Ketika resistor berharga maksimum, arus rotor yang mengalir minimum, sekaligus memperbaiki faktor kerja motor. Kelebihan pengasutan rotor lilit yaitu diperoleh torsi starting yang tinggi, dengan arus starting yang tetap terkendali.

Resistansi rotor luar dibuat bertahap Gambar 2.15 dengan tujuh tahapan. Saat tahap-1 nilai resistor maksimum kurva torsi terhadap slip, berikutnya tahap 2, 3, 4, 5, 6 dan tahap 7. Antara tahap-1 sampai tahap- 7 selisih slip sebesar  $\Delta s$ . Dengan demikian pengaturan resistor rotor juga berfungsi mengatur putaran rotor dari putaran rendah saat tahap-1 menuju putaran nominal pada tahap-7.



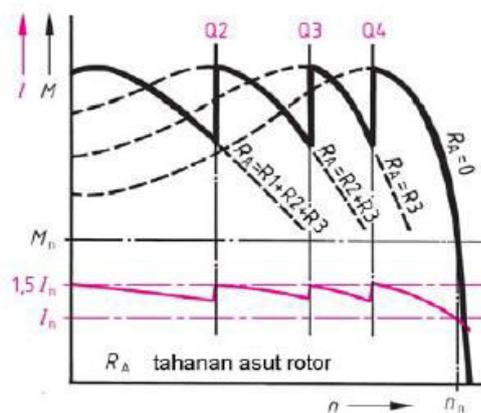
Gambar 2.14 Karakteristik Torsi Motor Slip Ring.

Pengaturan resistor rotor dapat menggunakan kontaktor electromagnet Gambar 2.15. Dengan menggunakan 3 tahap. Kontaktor Q1 menghubungkan stator dengan sumber daya listrik.



Gambar 2.15 Pengawatan Motor Slip Ring dengan Tiga Tahapan Resistor

1. Ketika  $Q2$ ,  $Q3$ ,  $Q4$  OFF resistansi rotor maksimum ( $R_A = R1 + R2 + R3$ ).
2. Saat  $Q2$  ON resistansi luar  $R_A = R2 + R3$ .
3. Ketika  $Q3$  ON resistansi  $R_A = R3$  saja.
4. Ketika  $Q4$  ON rotor kondisi terhubung singkat  $R_A = 0$ , motor bekerja nominal.



Gambar 2.16 Karakteristik Torsi dengan 3 Tahap

Grafik momen motor rotor lilit Gambar 2.16 dengan empat tahapan. Tahap pertama yang saat  $Q1$  kondisi ON dan  $Q2 + Q3 + Q4$  posisi OFF. maka rangkaian tahanan rotor besarnya maksimum, besarnya arus starting  $1,5 I_n$  sampai beberapa



saat ke tahap kedua. Tahap kedua  $Q2$  kondisi  $ON$  dan  $Q3+Q4$  posisi  $OFF$ , arus starting  $1,5 I_n$  menuju  $I_n$  sampai tahap ketiga. Tahap ketiga  $Q3$  kondisi  $ON$  dan  $Q4$  posisi  $OFF$ , arus starting kembali ke posisi  $1,5 I_n$  dan terakhir posisi tahap keempat saat  $Q4 ON$  semua resistor dihubungsingkatkan, dan motor cincin seret (slip ring) bekerja kondisi nominal.

### 2.3. Pembebanan Motor Cincin Seret

Dalam sistem arus bolak – balik arus dapat berbeda dengan tegangan yang disebabkan oleh jenis bebannya. Harga arus yang mengalir dalam rangkaian untuk suatu tegangan tertentu yang diberikan seluruhnya ditentukan oleh tahanan rangkaian. Harga arus bolak – balik yang mengalir dalam rangkaian tidak hanya bergantung pada rangkaian tetapi juga tergantung pada induktansi dan kapasitas rangkaian. Tahanan memberikan jenis perlawanan yang sama terhadap aliran arus bolak – balik seperti terhadap arus searah.

Pada motor induksi terjadi perubahan energi listrik menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran rotor. Daya mekanik yang dihasilkan digunakan untuk berbagai keperluan sesuai dengan kebutuhan seperti digunakan untuk menggerakkan turbine enclosure fan yang menjadi objek pengamatan pada laporan akhir ini.

Daya pada motor listrik dapat dihitung menggunakan perhitungan perfasa maupun perhitungan tiga fasa dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \dots\dots\dots(2.12)$$

$$\text{Harga Daya pada tegangan fasa (} V_p \text{) adalah } 3 \cdot V_p \cdot I_p \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana :

$P_{3\phi}$  = Daya aktif tiga fasa (W)

$V_L$  = Tegangan line – line / tegangan line (V)

$V_p$  = Tegangan perfasa (V)

$I_L$  = Arus (A)



### 2.4. Torsi

Torsi adalah kekuatan yang menghasilkan rotasi. Hal ini menyebabkan objek untuk berputar. Torsi terdiri dari gaya yang bekerja pada jarak. Torsi, seperti bekerja, diukur adalah pound-feet (lb-ft). Untuk menghitung torsi, kita dapat menerapkan rumus :

Apabila satuan T diubah menjadi satuan lb ft maka :

$$\begin{array}{ll}
1 \text{ lb} & = 4,447 \text{ N} & 1 \text{ lb ft} & = 1,356 \text{ Nm} \\
1 \text{ ft} & = 0,3048 \text{ m} & 1 \text{ Nm} & = 0,737 \text{ lb ft}
\end{array}$$

Dan untuk menghitung torsi motor pada saat beban penuh, kita dapat menerapkan rumus:

$$T = \frac{HP \times 5252}{n} \dots\dots\dots(2.14)$$

$$T_M = \frac{P_m}{\omega} \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\omega = 2. \pi. ns /60 \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana :

T = Torsi

T<sub>M</sub> = Torsi Mekanik

HP = Daya kuda

5252 = Konstan

ns = Kecepatan Motor Induksi pada medan stator

P<sub>M</sub> = Daya Motor

ω = Kecepatan sudut putar motor

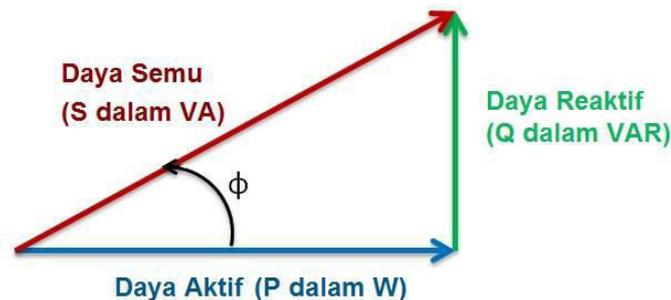
### 2.5. Pengertian Daya

Daya dalam tegangan AC pada setiap saat sama dengan perkalian dari harga arus dan tegangan paa 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 reaktasi dalam rangkaian arus dan tegangan tidak 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 :

- Daya reaktif (P) adalah daya yang diubah menjadi energi, persatuan waktu atau dengan kata lain daya aktif adalah daya yang benar-benar terpakai dan dihasilkan oleh komponen resistif, satuannya adalah watt (W). Dimana  $P = V \times I$ .
- Daya reaktif (Q) adalah daya yang ditimbulkan oleh komponen reaktansi, daya reaktif ditentukan dari reaktansi yang menimbulkannya, dapat berupa reaktansi induktif (XL) atau reaktansi kapasitif (XC), satuannya adalah volt ampere reaktif (VAR) . Dimana  $Q = V \times I \times \sin \varphi$ .
- Daya semu (S) adalah jumlah secara vektoris daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan volt ampere (VA). Pada motor 3 fasa  $S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$ .

Untuk lebih jelas dapat dilihat pada gambar sistem segi tiga daya berikut ini :



Gambar 2.17 Sistem Segitiga Daya

## 2.6. Slip<sup>4</sup>

Perbedaan kecepatan antara medan putar stator dengan rotor tergantung pada besarnya beban dari motor tersebut. Perbedaan putaran ini disebut dengan slip (S) yang dinyatakan dalam (%). Harga slip selalu berubah-ubah tergantung beban yang di pukul yaitu dari 100% saat start sampai dengan 0% saat diam ( $N_s = N_r$ ).

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 \%$$

<sup>4</sup> Sumanto, Drs. 1993. Motor Listrik Arus Bolak-Balik. Yogyakarta. Hal :43



## 2.7. Efisiensi Motor

Perhitungan efisiensi motor induksi melibatkan rugi-rugi yang terjadi pada stator dan rotor. Rugi-rugi stator terdiri atas rugi-rugi hysteresis, rugi-rugi eddy current, rugi-rugi inti dan rugi-rugi tembaga pada kumparan stator.

Efisiensi motor adalah perbandingan antara daya keluaran motor induksi dengan daya masukan motor induksi, yaitu dilihat pada persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$\eta(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana :

$P_{out}$  = Daya output motor induksi

$P_{in}$  = Daya input motor induksi

$$P_{out} = \frac{T.n}{9,55} \dots\dots\dots(2.18)$$

Keterangan :

V = Tegangan

I = Arus

$\cos \phi$  = Faktor Daya.

$P_{out}$  = Daya keluaran motor induksi

T = Torsi Motor

n = Kecepatan Motor induksi

9,55 = Konstanta

## 2.8. Definisi MATLAB (Matrix Laboratory)

MATLAB atau yang kita sebut dengan (Matrix Laboratory) yaitu sebuah program untuk menganalisis dan mengkomputasi data numerik, dan MATLAB juga merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan, yang dibentuk dengan dasar pemikiran yang menggunakan sifat dan bentuk matriks.

MATLAB yang merupakan singkatan dari Matrix Laboratory, merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh The Mathwork Inc. yang hadir



dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda dengan bahasa pemrograman lain yang sudah ada lebih dahulu seperti Delphi, Basic maupun C++.

### **Fungsi dari setiap window MATLAB**

#### a. MATLAB Command window/editor

MATLAB Command window/editor merupakan window yang muncul ketika kita membuka pertama kali setiap kita menjalankan aplikasi MATLAB. Pada window kita dapat melakukan akses-akses ke command-command MATLAB dengan cara mengetikkan barisan-barisan ekspresi MATLAB, seperti mengakses help window dan lain-lainnya.

Command Window (layar perintah) dapat kita gunakan untuk menjalankan program/perintah yang dibuat pada layar editor matlab. Pada windows/layar ini kita dapat mengakses perintah maupun komponen pendukung (help file dll) yang ada di matlab secara langsung. Salah satu cirri dari command windows ditandai dengan tanda prompt (>>).

#### b. MATLAB Editor/Debugger (Editor M-File/Pencarian Kesalahan)

Window ini merupakan tool yang disediakan oleh Matlab 5 keatas. Berfungsi sebagai editor script Matlab (M-file). Walaupun sebenarnya script ini untuk pemrograman Matlab dapat saja menggunakan editor yang lain seperti notepad, wordpad bahkan word.

Untuk mengakses window m-file ini dapat kita lakukan dengan cara :

1. Memilih menu File - kemudian pilih New
2. Pilih m-file, maka MATLAB akan menampilkan editor window :

selain dengan cara di atas untuk menampilkan editor M-file ini, kita dapat juga melakukannya dengan cara : `>> edit`

#### c. Figure Windows

Window ini merupakan hasil visualisasi dari script Matlab. Namun Matlab memberi kemudahan bagi programmer untuk mengedit window ini sekaligus memberikan program khusus untuk itu. Sehingga window ini selain berfungsi



sebagai visualisasi output dapat juga sekaligus menjadi media input yang interaktif.

d. MATLAB help window

MATLAB juga menyediakan sistem *help* yang dapat diakses dengan perintah *help*. Misalnya, untuk memperoleh informasi mengenai fungsi *elfun* yaitu fungsi untuk trigonometri, eksponensial, complex dan lain-lain, maka kita hanya perlu mengetikkan perintah berikut :

**Fungsi *help plot* di command window:**

Function **subplot** digunakan untuk membuat suatu figure dapat memuat lebih dari satu gambar. Perintah subplot didefinisikan sebagai :

• **subplot(n,m,i)**

Perintah tersebut membagi suatu figure menjadi suatu matriks  $m \times n$  area grafik dan *i*, berfungsi sebagai indeks penomoran gambar. Subplot dinomori dari kiri ke kanan dimulai dari baris teratas.

- a. Function **title** digunakan untuk memberi judul pada gambar. Input dari perintah title berupa string. Syntax title sebagai berikut : **title('string')**
- b. Function **xlabel** digunakan untuk memberi label sumbu pada sumbu x. Input dari perintah xlabel berupa string. Syntax xlabel sebagai berikut : **xlabel('string')**
- c. Function **ylabel** digunakan untuk memberi label sumbu y. Input dari perintah ylabel berupa string. Syntax ylabel sebagai berikut : **ylabel('string')**
- d. Function **axis** digunakan untuk mengatur nilai minimum dan maksimum dari sumbu x dan sumbu y , function axis didefinisikan sebagai : **axis([ xmin xmax ymin ymax ])**
- e. Function **grid** digunakan untuk memberi grid pada gambar kita
- f. Command Window = tempat syntax matlab ditulis dan dieksekusi
- g. Command History = tempat penyimpanan syntax Matlab yang pernah dijalankan user
- h. Workspace = tempat penyimpanan variable-variabel



- i. Current Directory = Folder utama tempat penyimpanan M-files yang akan dijalankan
- j. Syntax-syntax dasar Matlab :
- k. Operasi Dasar Matematika
  - + = tambah = penjumlahan
  - = kurang = pengurangan
  - \* = perkalian (vektor) = perkalian (vektor)
  - .\* = perkalian (skalar) = perkalian (skalar)
  - / = bagi = pembagian
  - ^ = pangkat = perpangkatan

Ex : Membuat Grafik

>>plot(a,b) = plot a (sb x) dan b (sb y)

>>figure = menambah figure baru

>>hold on = menimpa gambar lama

>>hold off = membersihkan figure

>>plot(x,y,'--

rs','Linewidth',2,'MarkerEdgeColor','k','MarkerFaceColor','g','MarkerSize',2)

artinya : -- garis putus-putus, r red, s square, tebal garis 2, warna garis kotak hitam, warna didalam kotak hijau, ukuran kotak 2.