



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Generator Sinkron

Menurut *Andersin P.M (1982)*, generator sinkron atau alternator merupakan mesin listrik arus bolak balik / AC (*Alternating Current*) yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC). Energi mekanik diperoleh dari penggerak mula (*prime mover*) yang terkopel dengan rotor generator, sedangkan energi listrik diperoleh dari proses induksi elektromagnetik yang melibatkan kumparan rotor dan kumparan stator. Tegangan output dari generator sinkron adalah tegangan bolak-balik (AC), oleh karena itu generator sinkron disebut juga generator AC. Mesin listrik arus bolak-balik (AC) ini disebut sinkron, karena jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator. Kecepatan sinkron ini dihasilkan dari kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama dengan medan magnet putar pada stator. Jika kumparan rotor yang berfungsi sebagai pembangkit kumparan medan magnet yang terletak di antara kutub magnet utara dan selatan diputar oleh tenaga air atau tenaga lainnya, maka pada kumparan rotor akan timbul medan magnet atau fluks putar.<sup>1</sup>

Generator sinkron secara umum dapat diklasifikasikan berdasarkan bentuk rotornya, yaitu generator turbo / generator rotor silinder (*cylindrical-rotor generator*) dan generator kutub menonjol (*salient pole generator*). Generator yang digunakan pada pembangkit listrik yang besar biasanya merupakan jenis generator turbo yang beroperasi pada kecepatan tinggi dan dikopel dengan turbin gas atau uap. Sedangkan generator kutub menonjol (*salient pole generator*) biasanya digunakan untuk pembangkit listrik kecil dan menengah.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> Ir. Hamzah Ibrahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1996, hlm 7

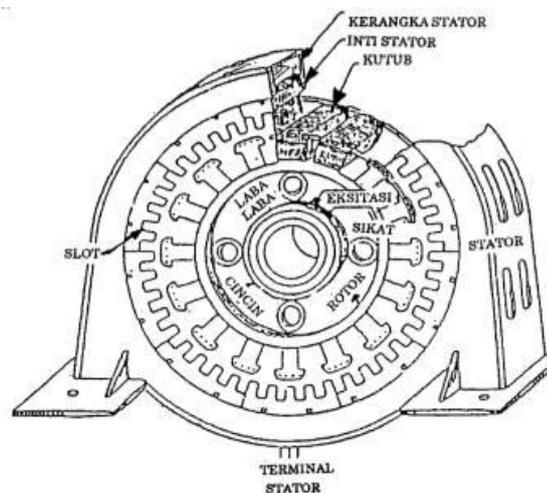
<sup>2</sup> D. F. Warne, *Newest Electrical Power Engineer's Handbook*, 2005, hlm 105



## 2.2 Konstruksi Generator Sinkron<sup>3</sup>

Konstruksi generator sinkron yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1 di bawah ini, terdiri dari :

1. Rotor; adalah bagian dari mesin yang berputar berbentuk silinder.
2. Stator; adalah bagian dari mesin yang diam dan berbentuk silinder.
3. *Slot* (celah udara); adalah ruangan antara stator dan rotor.



Gambar 2.1 Konstruksi generator sinkron.

### 2.2.1 Rotor<sup>4</sup>

Pada generator sinkron, medan magnet rotor dihasilkan dengan merancang rotor sebagai magnet permanen atau dengan menerapkan arus searah / arus DC (*Direct Current*) ke rotor yang berkelok-kelok untuk menciptakan elektromagnet. Rotor generator kemudian diputar oleh penggerak utama, menghasilkan medan magnet berputar di dalam mesin. Medan magnet berputar ini menginduksi rangkaian tegangan tiga fasa di dalam kumparan stator generator.

Konstruksi rotor terdiri dari dua jenis, yaitu :

1. Jenis kutub menonjol (*salient pole*) untuk generator dengan kecepatan rendah dan sedang. Kutub menonjol terdiri dari : inti kutub, badan kutub dan sepatu kutub. Belitan medan dililitkan pada badan kutub, pada sepatu kutub juga

<sup>3</sup> Ir. Hamzah Ibrahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1996, hlm 162

<sup>4</sup> Stephen J. Chapman, *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, 2002, hlm 192-196



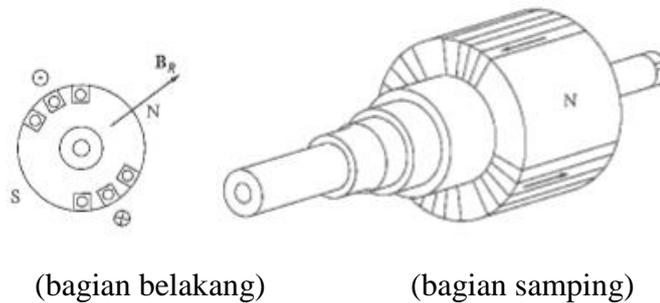
dipasang belitan peredam (*damper winding*). Belitan kutub dari tembaga, badan kutub dan sepatu kutub dari besi lunak.

2. Jenis kutub silinder untuk generator dengan kecepatan tinggi, terdiri dari alur-alur yang dipasang kumparan medan juga ada gigi-gigi. Alur dan gigi tersebut terbagi atas pasangan-pasangan kutub.

Dua istilah yang biasa digunakan untuk menggambarkan kumparan pada mesin adalah kumparan medan dan belitan / kumparan armatur. Secara umum, istilah kumparan medan berlaku untuk kumparan yang menghasilkan medan magnet utama pada mesin, dan istilah kumparan armatur berlaku pada kumparan dimana tegangan utama diinduksi. Pada konstruksi generator sinkron, yaitu kumparan jangkar disebut juga kumparan stator karena berada pada tempat yang tetap, sedangkan kumparan rotor bersama-sama dengan kutub magnet diputar oleh tenaga mekanik dengan alasan :

1. Belitan jangkar lebih kompleks dari pada belitan medan sehingga lebih mudah dan lebih terjamin ditempatkan pada struktur yang diam serta tegar yakni stator.
2. Lebih mudah mengisolasi dan melindungi belitan jangkar terhadap tegangan yang tinggi.
3. Pendinginan belitan jangkar mudah karena inti stator yang dibuat cukup besar sehingga dapat didinginkan dengan udara paksa.
4. Belitan medan mempunyai tegangan rendah sehingga dapat efisien bila dipakai pada kecepatan yang tinggi.

Rotor generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet besar, kutub magnet pada rotor dapat berupa konstruksi yang menonjol atau tidak biasa. Istilah yang menonjol berarti "menonjol" atau "mencuat," dan tiang yang menonjol adalah kutub magnet yang menonjol secara radial dari poros rotor. Di sisi lain, sebuah kutub yang tidak biasa adalah kutub magnetis dengan kumparan yang tertanam sama rata pada permukaan rotor. Rotor *non salient* (tidak menonjol) ditunjukkan pada Gambar 2.2 di bawah ini.

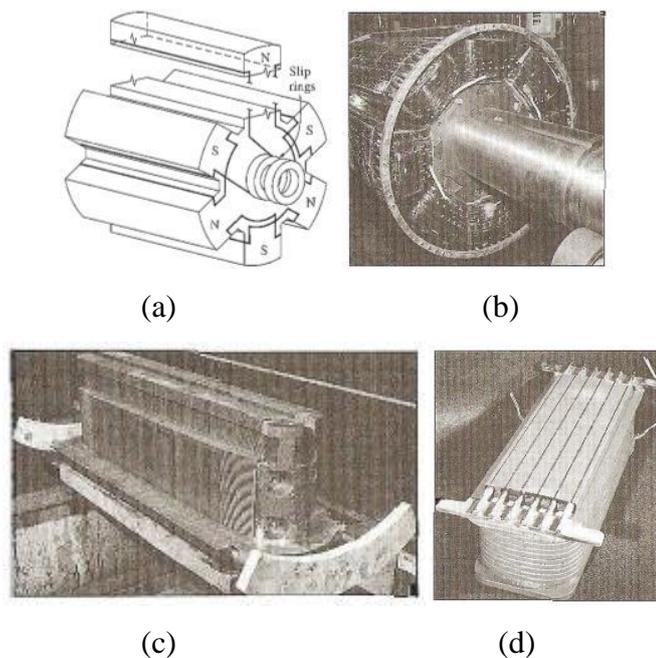


(bagian belakang)

(bagian samping)

Gambar 2.2 Rotor *non salient* (tidak menonjol) dua kutub pada generator sinkron.

Pada permukaan rotor sebuah rotor tiang menonjol ditunjukkan pada Gambar 2.3 di bawah ini. Perhatikan bahwa di sini kumparan elektromagnet dililitkan di sekitar kutub itu sendiri, bukannya tertanam pada permukaan rotor. Nonsa Rotor *nonsalient* biasanya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor tiang menonjol biasanya digunakan untuk rotor dengan empat kutub atau lebih. Karena rotor dikenai medan magnet yang berubah, maka rotor harus terbuat dari laminasi tipis untuk mengurangi kehilangan arus Eddy (arus Eddy adalah arus listrik yang diinduksikan kedalam konduktor dengan mengubah medan magnet konduktor tersebut).



(a)

(b)

(c)

(d)

Gambar 2.3 Rotor *salient* (menonjol) pada generator sinkron.



Keterangan Gambar 2.3 :

- (a) Rotor enam kutub yang menonjol untuk mesin sinkron.
- (b) Foto dari rotor mesin sinkron delapan kutub yang menonjol menunjukkan kumparan pada kutub rotor masing-masing.
- (c) Foto tiang tunggal yang menonjol dari sebuah rotor dengan kumparan medan yang belum ada.
- (d) Sebuah tiang tunggal yang menonjol ditunjukkan setelah kumparan lapangan dipasang tapi sebelum dipasang pada rotor.

Arus DC harus dipasok ke arus medan pada rotor jika itu adalah elektromagnet. Karena rotor berputar, diperlukan pengaturan khusus untuk mendapatkan daya DC ke kumparan medannya. Ada dua cara umum untuk memasok daya DC ini:

1. Pasokan daya DC dari sumber eksternal ke rotor dengan menggunakan cincin slip dan sikat.
2. Pasokan daya DC dari sumber daya DC khusus yang dipasang langsung pada poros generator sinkron.

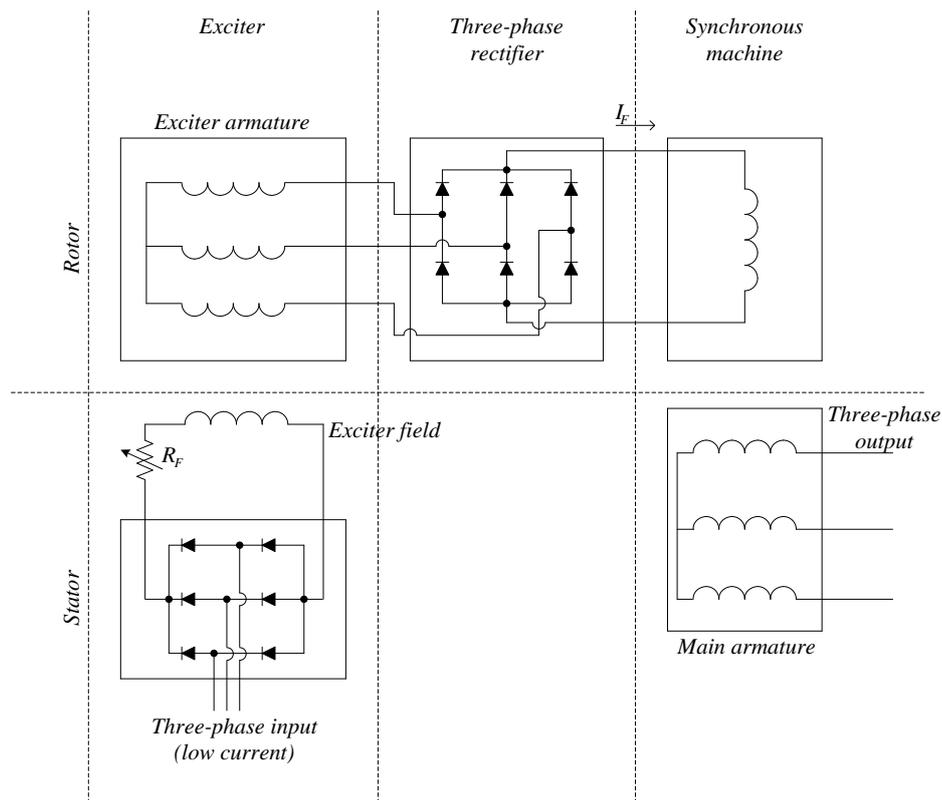
*Slip ring* (cincin slip) adalah cincin logam yang benar-benar mengelilingi poros mesin tapi terisolasi darinya. Salah satu ujung kumparan rotor DC terkait dengan masing-masing dari dua cincin slip pada poros mesin sinkron, dan sikat stasioner (*stationary brush*) naik pada masing-masing cincin slip. Sebuah "sikat" adalah blok senyawa seperti karbon grafit yang bertingkah laku seperti listrik secara bebas namun memiliki gesekan yang sangat rendah, sehingga tidak menggunakan *slip ring*. Jika ujung positif sumber tegangan DC dihubungkan ke satu sikat dan ujung negatifnya terhubung ke sisi yang lain, maka tegangan DC yang sama akan diterapkan pada medan yang berkelok-kelok setiap saat terlepas dari posisi sudut atau kecepatan rotornya.

*Slip ring* dan sikat membuat beberapa masalah saat digunakan untuk memasok daya ke kumparan medan pada mesin sinkron. Mereka meningkatkan jumlah perawatan yang dibutuhkan pada mesin, karena sikat harus diperiksa untuk



dipakai secara teratur. Selain itu, penurunan voltase sikat bisa menjadi penyebab kerugian daya yang signifikan pada mesin dengan arus medan lebih besar.

Pada generator lebih besar, penguat / eksitasi tanpa sikat (*brushless exciters*) digunakan untuk memasok arus medan ke mesin. *Brushless exciters* adalah generator AC kecil dengan arus medannya terpasang di stator dan arus armaturnya terpasang di poros rotor. Keluaran tiga fasa dari eksitasi generator disearahkan ke arus balik oleh rangkaian penyearah tiga fasa yang juga terpasang pada poros generator, kemudian dimasukkan ke dalam rangkaian medan utama. Dengan mengendalikan medan kecil, arus eksitasi generator yang terletak di stator adalah untuk menyesuaikan arus medan pada mesin utama tanpa *slip ring* dan sikat. Pengaturan ini ditunjukkan secara skematis pada Gambar 2.4 dibawah ini.



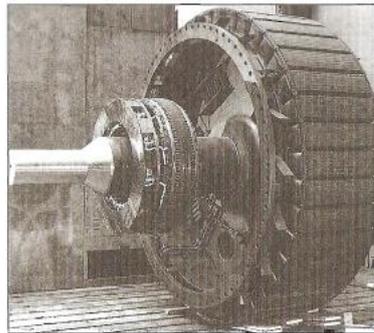
Gambar 2.4 Arus *brushless exciter* (penguat tanpa sikat).

Pada Gambar 2.4 di atas, arus tiga fasa kecil diperbaiki dan digunakan untuk memasok rangkaian medan eksitasi yang terletak di stator. Keluaran dari



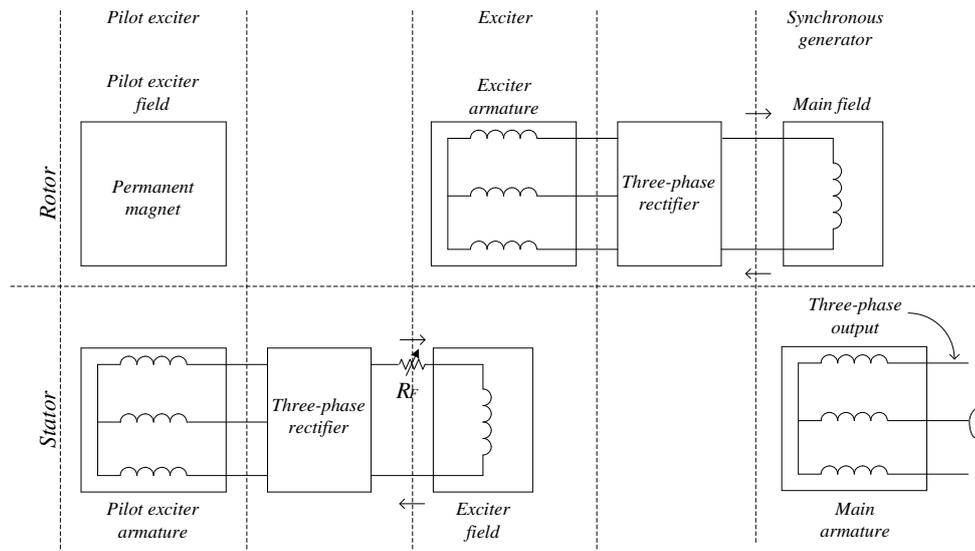
rangkaian armatur eksitasi (pada rotor) kemudian diperbaiki dan digunakan untuk memasok arus medan pada mesin utama.

Karena tidak ada kontak mekanis yang pernah terjadi antara rotor dan stator, *brushless exciter* memerlukan perawatan yang jauh lebih sedikit daripada *slip ring* dan sikat. Rotor mesin sinkron dengan *brushless exciter* yang dipasang pada poros yang sama ditunjukkan pada Gambar 2.5 bawah ini.



Gambar 2.5 Foto rotor mesin sinkron dengan *brushless exciter* yang dipasang pada poros yang sama.

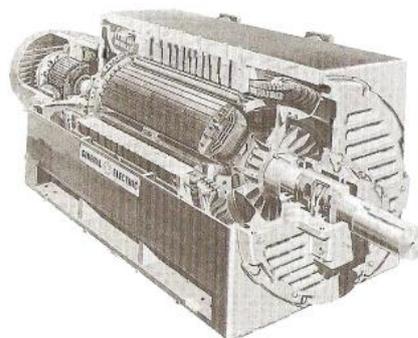
Untuk membuat eksitasi generator yang benar-benar independen dari sumber daya eksternal, *pilot* kecil sering disertakan dalam sistem. *Pilot* adalah generator AC kecil dengan magnet permanen yang terpasang pada poros rotor dan kumparan tiga fasa pada stator. Ini menghasilkan tenaga untuk rangkaian medan eksitasi, yang pada gilirannya mengendalikan arus medan pada mesin utama. Jika *pilot exciter* (eksitasi pilot) disertakan pada poros generator, maka tidak diperlukan daya listrik eksternal untuk menjalankan generator. Magnet permanen dari *pilot exciter* menghasilkan arus medan eksitasi, yang pada gilirannya menghasilkan arus medan pada mesin utama, ditunjukkan oleh Gambar 2.6 di bawah ini.



Gambar 2.6 Skema *brushless exciter* yang mencakup *pilot exciter*.

Banyak generator sinkron yang termasuk *brushless exciter* juga memiliki *slip ring* dan sikat, sehingga sumber tambahan arus medan DC tersedia dalam keadaan darurat. Stator generator sinkron biasanya dibuat dari kumparan stator yang dibentuk sebelumnya dalam lapisan ganda. Kumparan itu sendiri didistribusikan dan dihubungkan untuk mengurangi kandungan harmonisa tegangan keluaran dan arus.

Diagram lepas dari mesin sinkron besar lengkap ditunjukkan pada Gambar 2.7 di bawah ini. Gambar ini menunjukkan rotor kutub menonjol delapan kutub, sebuah stator dengan kumparan lapisan ganda yang disebar dan *brushless exciter*.



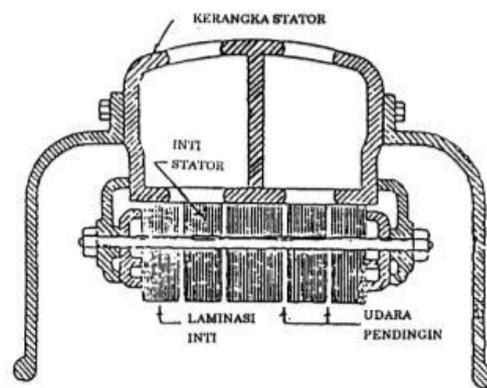
Gambar 2.7 Potongan diagram dari mesin sinkron besar.



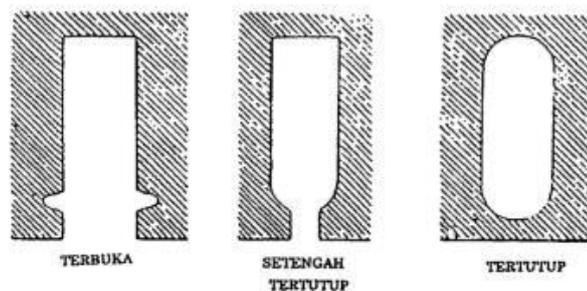
### 2.2.2 Stator<sup>5</sup>

Konstruksi stator terdiri dari:

1. Kerangka dari besi tuang untuk menyangga inti jangka.
2. Inti jangkar dari besi lunak / baja silikon.
3. Alur / parit / *slot* dan gigi tempat meletakkan belitan (kumparan), bentuk alur ada yang terbuka setengah tertutup dan tertutup.
4. Belitan jangkar yang terbuat dari tembaga dan diletakkan pada alur.



Gambar 2.8 Kerangka dari inti stator.



Gambar 2.9 Bentuk alur (*slot*) jangkar pada stator.

### 2.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron<sup>6</sup>

Prinsip kerja generator sinkron berdasarkan induksi elektromagnetis. Setelah rotor diputar oleh penggerak mula (*prime mover*), dengan demikian kutub-kutub yang ada pada rotor akan berputar. Jika kumparan kutub diberi arus searah,

<sup>5</sup> Ir. Hamzah Ibrahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1996, hlm 163

<sup>6</sup> Ir. Hamzah Ibrahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1996, hlm 168



maka pada permukaan kutub akan timbul medan magnet (garis-garis gaya fluks) yang berputar kecepataannya sama dengan putaran kutub. Garis-garis gaya fluks yang berputar tersebut akan memotong kumparan jangkar yang ada di stator sehingga pada kumparan jangkar tersebut timbul EMF atau GGL atau tegangan induksi. Frekuensi EMF atau GGL atau tegangan induksi tersebut mengikuti Persamaan 2.1 di bawah ini :

$$f = \frac{P \cdot N}{120} \text{ hz} \dots \dots \dots (2.1)$$

Keterangan :

P = banyaknya kutub

N = kecepatan putar (rpm)

Oleh karena frekuensi dari tegangan induksi tersebut di Indonesia sudah tertentu yakni 50 Hz dan jumlah kutub selalu genap maka putaran kutub / putaran motor / putaran penggerak mula sudah tertentu.

#### 2.4 Efisiensi Generator Sinkron

Efisiensi atau daya guna atau rendemen dari generator sinkron dapat dihitung seperti pada generator dapat dirumuskan pada persamaan 2.2 sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi } (\eta) = \frac{[\text{Daya output } (P_o)]}{[\text{Daya output } (P_o)] + [\Sigma \text{Rugi Daya } (P_{\text{loss}})]} \times 100\% \dots \dots \dots (2.2)^7$$

Dimana,

$$\Sigma \text{Rugi Daya } (P_{\text{loss}}) = I_{\text{beban}}^2 + R \dots \dots \dots (2.3)^8$$

$$R = Z \times \text{Cos}\phi \dots \dots \dots (2.4)$$

$$Z = \frac{V_L}{I_{\text{armatur}} \sqrt{3}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

$I_{\text{beban}}$  = Arus beban

R = Resistansi

$\text{Cos}\phi$  = Faktor daya

$V_L$  = Tegangan

Z = Impedansi

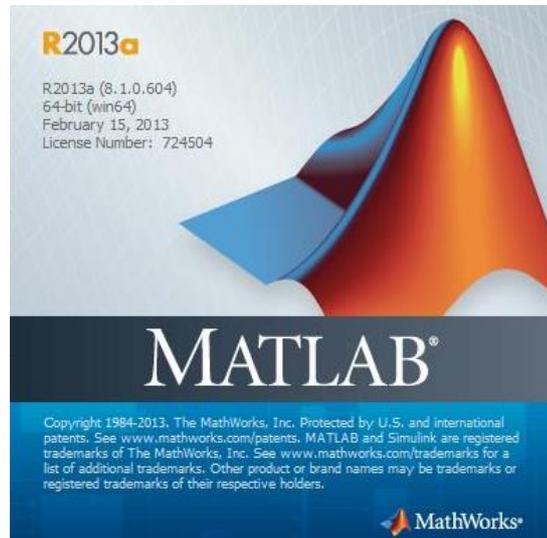
$I_{\text{armatur}}$  = Arus jangkar

<sup>7</sup> Ir. Hamzah Ibrahim, *Teknik Tenaga Listrik*, 1996, hlm 178

<sup>8</sup> Desvel Gama Saputra, *Analisa Pengaruh Beban Terhadap Efisiensi Generator PLTU di PLTGU Indralaya Menggunakan MATLAB*, 2011, hlm 35



## 2.5 MATLAB<sup>9</sup>



Gambar 2.10 Aplikasi MATLAB.

MATLAB adalah bahasa komputasi teknis tingkat tinggi dan lingkungan interaktif untuk pengembangan algoritma, visualisasi data, analisis data, dan perhitungan numerik. Add-on toolboxes (koleksi fungsi MATLAB tujuan khusus, tersedia terpisah) memperluas lingkungan MATLAB untuk memecahkan masalah kelas tertentu di area aplikasi ini. MATLAB menyediakan sejumlah fitur untuk mendokumentasikan dan berbagi pekerjaan. Fitur pada MATLAB, meliputi :

1. Bahasa tingkat tinggi untuk komputasi teknis.
2. Lingkungan pengembangan untuk mengelola kode, file, dan data.
3. Alat interaktif untuk eksplorasi, perancangan, dan pemecahan masalah iteratif.
4. Fungsi matematika untuk aljabar linier, statistik, analisis Fourier, penyaringan, optimasi, dan integrasi numerik.
5. Fungsi grafis 2-D dan 3-D untuk memvisualisasikan data.
6. Alat untuk membangun antarmuka pengguna grafis khusus.
7. Fungsi untuk mengintegrasikan algoritma berbasis MATLAB dengan aplikasi dan bahasa eksternal, seperti C, C ++, *Fortran*, *Java™*, COM, dan *Microsoft® Excel®*

<sup>9</sup> *E-book MATLAB® 7 Getting Started GUIDE*



### 2.5.1 Sistem MATLAB

Sistem MATLAB terdiri dari bagian-bagian utama ini: *Desktop Tools* and *Development Environment*.

Bagian MATLAB ini adalah seperangkat alat dan fasilitas yang membantu untuk menggunakan dan menjadi lebih produktif dengan fungsi dan file MATLAB. Ini termasuk: *Desktop MATLAB* dan *Command Window*, *editor* dan *debugger*, penganalisis kode, dan *browser* untuk melihat bantuan, ruang kerja, dan folder.

### 2.5.2 Perpustakaan Fungsi Matematika MATLAB

Perpustakaan ini adalah kumpulan algoritma komputasi yang luas mulai dari fungsi dasar, seperti jumlah, sinus, kosinus, dan aritmatika kompleks, hingga fungsi yang lebih canggih seperti *invers* matriks, nilai *eigen* matriks, fungsi *Bessel*, dan transformasi *Fourier* yang cepat.

### 2.5.3 Bahasa MATLAB

Bahasa MATLAB adalah matriks tingkat tinggi / bahasa *array* dengan pernyataan *flow control*, fungsi, struktur data, *input / output*, dan fitur pemrograman berorientasi objek. Hal ini memungkinkan "pemrograman dalam kecil" untuk cepat membuat program cepat yang tidak ingin digunakan kembali. MATLAB juga bisa melakukan "*programming in the large*" untuk membuat program aplikasi yang kompleks yang ditujukan untuk digunakan kembali.

### 2.5.4 Grafik MATLAB

MATLAB memiliki fasilitas yang luas untuk menampilkan vektor dan matriks sebagai grafik, serta menganotasi dan mencetak grafik ini. Ini mencakup fungsi tingkat tinggi untuk visualisasi data dua dimensi dan tiga dimensi, pemrosesan gambar, animasi, dan grafik presentasi. Ini juga mencakup fungsi tingkat rendah yang memungkinkan untuk menyesuaikan tampilan grafis secara keseluruhan dan juga untuk membangun antarmuka pengguna grafis lengkap pada aplikasi MATLAB.



### 2.5.5 Antarmuka Eksternal MATLAB

Perpustakaan antarmuka eksternal memungkinkan untuk menulis program C / C ++ dan *Fortran* yang berinteraksi dengan MATLAB. Ini mencakup fasilitas untuk memanggil rutinitas dari MATLAB (*dynamic linking*), untuk memanggil MATLAB sebagai mesin komputasi, dan untuk membaca dan menulis *file* MAT.

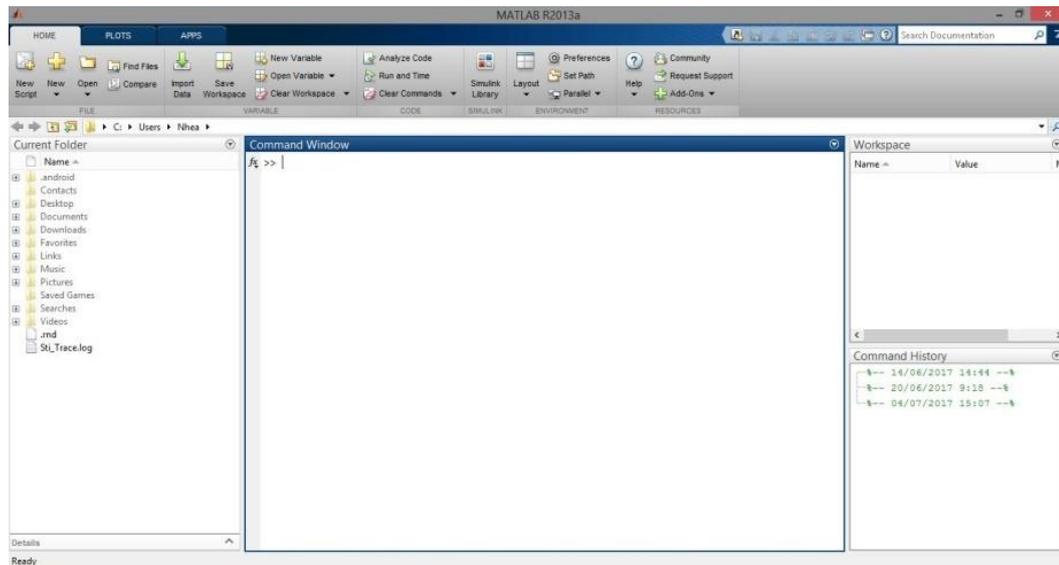
### 2.5.6 Memulai Sesi MATLAB

Pada *platform Microsoft Windows*®, jalankan program MATLAB dengan mengklik dua kali *shortcut* MATLAB di *desktop Windows*. Pada *platform Apple Macintosh*®, jalankan MATLAB dengan mengklik dua kali ikon MATLAB di folder Aplikasi. Pada *platform UNIX*®, matikan MATLAB dengan mengetikkan *matlab* pada *prompt* sistem operasi.

Ketika memulai MATLAB, secara *default*, MATLAB memuat secara otomatis semua *file* program yang disediakan oleh *MathWorks* untuk MATLAB dan produk *MathWorks* lainnya. Jadi, tidak perlu memulai setiap produk yang ingin digunakan.

### 2.5.7 Desktop MATLAB

Ketika memulai MATLAB, *desktop* muncul, berisi alat (antarmuka pengguna grafis) untuk mengelola *file*, variabel, dan aplikasi yang terkait dengan MATLAB seperti Gambar 2.11 di bawah ini :

Gambar 2.11 Tampilan *Desktop* pada MATLAB.

### 2.5.8 Keluar dari Program MATLAB

Untuk mengakhiri sesi MATLAB, pilih *File > Exit MATLAB* di *desktop*, atau ketik berhenti di *Command Window*. Jalankan *file skrip* yang bernama *finish.m* setiap kali Matlab berhenti, misalnya, menjalankan fungsi untuk menghemat ruang kerja.

### 2.5.9 Konfirmasi Berhenti dari Program MATLAB

MATLAB dapat menampilkan kotak dialog konfirmasi sebelum berhenti. Untuk mengatur pilihan ini, pilih *File > Preferences > General > Confirmation Dialogs*, dan pilih kotak centang *Confirm* sebelum keluar dari MATLAB.

### 2.5.10 Variabel MATLAB

Seperti kebanyakan bahasa pemrograman lainnya, bahasa MATLAB menyediakan ekspresi matematis, namun tidak seperti kebanyakan bahasa pemrograman, ungkapan ini melibatkan keseluruhan matriks.

MATLAB tidak memerlukan deklarasi jenis atau pernyataan dimensi. Ketika MATLAB menemukan nama variabel baru, maka secara otomatis akan menciptakan variabel dan mengalokasikan jumlah penyimpanan yang sesuai. Jika



variabel sudah ada, MATLAB mengubah isinya dan, jika perlu, mengalokasikan penyimpanan baru. Sebagai contoh,

```
num_students = 25
```

Membuat matriks satu demi satu bernama *num\_students* dan menyimpan nilai 25 dalam elemen tunggal. Untuk melihat matriks yang ditugaskan pada variabel apapun, cukup masukkan nama variabel. Nama variabel terdiri dari sebuah huruf, diikuti oleh sejumlah huruf, angka, atau garis bawah.

MATLAB adalah *case sensitive*; ini membedakan antara huruf besar dan huruf kecil. A dan a bukan variabel yang sama. Meskipun nama variabel bisa sama panjangnya, MATLAB hanya menggunakan karakter N pertama dari nama tersebut, (di mana N adalah nomor yang dikembalikan oleh fungsi *namelengthmax*), dan mengabaikan sisanya. Oleh karena itu, penting untuk membuat setiap nama variabel unik dalam karakter N pertama yang memungkinkan MATLAB membedakan variabel.

```
N = namelengthmax
```

```
N = 63
```

Fungsi *genvarname* dapat berguna dalam membuat nama variabel yang valid dan unik.

### 2.5.11 Angka MATLAB

MATLAB menggunakan notasi desimal konvensional, dengan titik desimal opsional dan tanda plus atau minus utama, untuk angka. Notasi ilmiah menggunakan huruf e untuk menentukan faktor skala *power-of-ten*. Nomor imajiner menggunakan i atau j sebagai akhiran. Beberapa contoh nomor legal adalah

Tabel 2.1 Contoh nomor legal pada MATLAB

3	-99	0.0001
9.6397238	1.60210e-20	1.60210e-20
li	-3.14159j	3e5i



MATLAB menyimpan semua nomor secara *internal* dengan menggunakan format panjang yang ditentukan oleh standar *floating-point* IEEE®. Angka *floating-point* memiliki ketepatan hingga kira-kira 16 digit desimal yang signifikan dan kisaran yang terbatas kira-kira  $10^{-308}$  sampai  $10^{+308}$ . Bilangan yang terwakili dalam format ganda memiliki presisi maksimum 52 bit. Setiap ganda membutuhkan lebih banyak bit dari 52 kehilangan beberapa presisi.

### 2.5.12 Operator MATLAB

Eksresi menggunakan operator aritmatika dan peraturan yang didahulukan.

Tabel 2.2 Operator pada MATLAB

+	Penambahan.
-	Pengurangan.
*	Perkalian.
/	Divisi.
\	<i>Left division.</i>
^	<i>Power 'Complex conjugate transpose.</i>
()	Penentu urutan evaluasi.