

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sebuah sistem tenaga listrik tersusun dari unit pembangkit, jalur transmisi, dan juga beban. Bertambahnya jumlah penduduk serta majunya sektor industri dan ekonomi membuat permintaan listrik semakin tinggi. Naiknya kebutuhan listrik ini membawa pengaruh besar pada kestabilan sistem. Oleh karena itu, kestabilan menjadi hal yang sangat penting untuk dijaga dalam jaringan listrik. Saat dioperasikan, sistem ini pasti tidak dapat terhindar dari berbagai kendala. Berbagai kendala tersebut, seperti terlepasnya generator, korsleting (hubung singkat), *starting* motor, hingga perubahan beban secara tiba-tiba, dapat membuat sistem tersebut kehilangan kestabilannya (Dewantara & Sulistiawati, 2018).

(Hasibuan, 2018) menyatakan, sistem tenaga listrik yang ideal adalah sistem yang mampu melayani beban secara terus-menerus dengan nilai tegangan dan frekuensi yang tetap. Jika terjadi naik turun (fluktuasi) pada tegangan dan frekuensi, nilainya harus tetap berada dalam batas yang diperbolehkan agar peralatan listrik konsumen bisa berfungsi dengan baik dan aman. Meskipun pada kenyataannya kondisi sistem yang benar-benar sempurna itu tidak pernah ada karena beban selalu berubah-ubah, penyaluran energi listrik bisa dikatakan handal apabila sistem tersebut mampu menjaga kestabilannya saat muncul gangguan.

Menurut (Stevenson & Idris, 1984), kestabilan sistem tenaga listrik dapat diartikan sebagai kemampuan sistem yang membuat mesin-mesin di dalamnya tetap beroperasi secara serempak (sinkron) saat merespons gangguan, serta mampu kembali ke kondisi semula setelah terjadi gangguan. Walaupun kestabilan suatu sistem bisa dilihat secara keseluruhan, namun untuk keperluan analisis, kestabilan ini dibagi ke dalam tiga jenis, yaitu: kestabilan tunak (*steady state stability*), kestabilan dinamik (*dynamic stability*), dan kestabilan peralihan (*transient stability*).

(Jamlaay, 2022) juga menambahkan, stabilitas transien adalah kemampuan jaringan listrik untuk tetap berjalan serempak (sinkron) setelah terkena gangguan besar secara tiba-tiba. Kondisi ini biasanya berlangsung selama sekitar satu ayunan (*first swing*), dengan anggapan bahwa pengatur tegangan (AVR) dan governor belum mulai bekerja. Masalah kestabilan ini bisa dibedakan menjadi dua, yaitu kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multiswing*). Analisis kestabilan ayunan pertama memakai model generator yang sederhana tanpa melibatkan sistem pengaturannya, dimana waktu yang diamati biasanya hanya berfokus pada ayunan pertama sesaat setelah gangguan terjadi. Lewat dari masa tersebut, governor akan mulai merespons umumnya dalam waktu kurang dari lima detik sehingga sistem akan beralih ke stabilitas dinamis.

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem tenaga listrik apabila mengalami gangguan adalah metode kriteria sama luas. Walaupun metode ini tidak dapat dipergunakan untuk sistem multimesin karena memiliki keterbatasan yang signifikan dimana metode tersebut hanya berlaku untuk kasus yang sangat sederhana, yaitu Sistem Satu Mesin Terhadap Bus Tak Berhingga (SMIB). Dimana sistem tenaga listrik multimesin, seperti sistem uji 3-generator, 6-bus

memerlukan pemodelan yang jauh lebih kompleks. Untuk mengatasi tantangan ini, analisis kestabilan transien harus dilakukan melalui tiga tahap perhitungan yaitu, perhitungan *load flow* untuk menentukan kondisi operasi awal sistem (*pre-fault*), penyederhanaan matriks menggunakan metode Reduksi Kron, pemodelan dinamis untuk merumuskan persamaan ayunan serta solusi numerik terhadap persamaan tersebut. Dalam konteks solusi numerik, penelitian ini menggunakan Metode Runge-Kutta Orde 4 (RK4) sebagai metode integrasi yang optimal karena menawarkan akurasi tinggi dan stabilitas numerik yang baik.

MATLAB adalah perangkat lunak pemrograman standar di bidang matematika dan teknik. Meski awalnya hanya dipakai oleh para insinyur, kini penggunaannya telah meluas ke dunia pendidikan untuk menyelesaikan berbagai perhitungan seperti matriks dan aljabar linear (Andani, et al., 2020). Keunggulan utama MATLAB ada pada kecepatannya dalam memproses operasi matriks untuk memecahkan masalah matematika yang rumit. Selain itu, MATLAB juga memiliki fitur antarmuka grafis (GUI) yang memudahkan pengguna menjalankan program lewat tombol dan menu visual, sehingga tidak perlu lagi mengetik perintah (kode) secara manual.

Tugas akhir ini bertujuan untuk merancang antarmuka grafis (GUI) pada MATLAB agar perangkat lunak yang dihasilkan lebih interaktif dan efisien. Melalui GUI, pengguna yang tidak terbiasa dengan bahasa pemrograman (koding) tetap bisa menjalankan program lewat tampilan visual seperti tombol dan grafik, sehingga memudahkan kolaborasi antara orang teknis dan non-teknis. Proses pembuatan antarmuka ini juga lebih cepat karena MATLAB memiliki fitur *App Designer* dan *GUIDE* yang menggunakan metode *drag-and-drop*. Selain itu, GUI mampu menampilkan grafik hasil simulasi secara langsung (*real-time*), sehingga hasil analisis data jauh lebih mudah untuk dipahami.

Penelitian berjudul "PENGEMBANGAN SOFTWARE ANALISIS STABILITAS TRANSIEN UNTUK SISTEM MULTIMACHINE" ini dilakukan untuk mengatasi keterbatasan metode klasik dan rumitnya perhitungan pada sistem multimesin. Tujuannya adalah untuk menciptakan alat analisis dan pemantauan kestabilan transien yang efektif melalui GUI MATLAB. Perangkat lunak ini hadir sebagai solusi praktis dan terjangkau untuk kebutuhan edukasi serta analisis awal, mengingat *software* komersial yang ada saat ini umumnya mahal dan terlalu kompleks. Untuk mewujudkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan algoritma *load flow* guna menentukan kondisi awal, dilanjutkan dengan penerapan metode Reduksi Kron, Persamaan Ayunan, dan integrasi numerik Runge-Kutta Orde 4 (RK4). Melalui pengujian pada sistem uji 3-generator 6-bus di lingkungan MATLAB, *software* ini nantinya akan menganalisis respons sudut rotor serta kecepatan sudut rotor terhadap waktu.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengembangan analisis kestabilan transien untuk sistem multimesin dengan menggunakan *Graphical User Interface* (GUI) pada MATLAB?
2. Bagaimana validasi antara perhitungan *software* menggunakan fitur *Graphical User Interface* (GUI) pada MATLAB untuk sistem multimesin dengan studi kasus yang telah ada?

3. Bagaimana *software* yang telah dikembangkan dapat di akses dengan mudah tanpa harus membuka MATLAB?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mendesain *software* analisis kestabilan transien untuk sistem multimesin berbasis *Graphical User Interface* (GUI) pada MATLAB.
2. Memvalidasi hasil perhitungan dari *software* menggunakan fitur *Graphical User Interface* (GUI) pada MATLAB untuk sistem multimesin yang telah dikembangkan dengan studi kasus yang telah ada.
3. Membuat *software* yang dapat berdiri sendiri (*standalone*) tanpa harus membuka MATLAB.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Hasil penelitian ini dapat berguna untuk menambah pengetahuan serta sebagai bahan referensi mengenai pengimplementasian analisis kestabilan transien sistem multimesin.
2. Dapat membantu dalam merawat serta melakukan ekspansi dalam bidang kelistrikan.
3. Tugas akhir ini dapat memberi pemahaman yang lebih baik mengenai GUI.

1.5 Batasan Masalah

1. Kestabilan yang dibahas hanya pada kestabilan sudut rotor (*rotor angle stability*), khususnya stabilitas transien (*transient stability*).
2. Pembuatan *software* yaitu menggunakan MATLAB R2024b dengan fitur GUI.
3. Menggunakan metode perhitungan Newton-Raphson, Reduksi Kron, Persamaan Ayunan serta menggunakan metode Runge-Kutta Orde 4 (RK4).
4. Untuk sistem uji multimesin (3-generator, 6-bus).

1.6 Teori

1.6.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

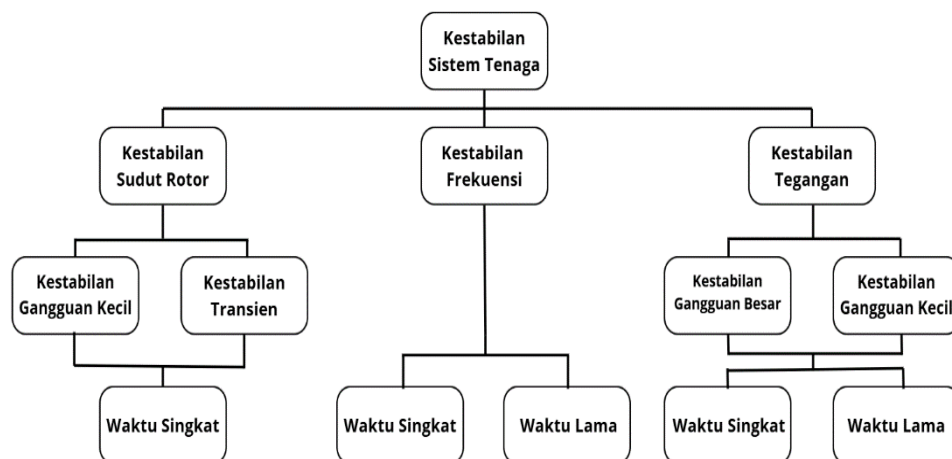
Salah satu tolak ukur stabilnya jaringan listrik adalah adanya keseimbangan antara suplai daya dari generator dan kebutuhan beban. Saat dioperasikan, besar dan letak beban dalam sistem kelistrikan pasti selalu berubah-ubah setiap waktu. Karena itu, setiap generator harus mampu menyesuaikan daya yang dihasilkannya melalui pengaturan governor dan eksitasi agar sesuai dengan perubahan beban tersebut. Jika penyesuaian ini gagal dilakukan, keseimbangan daya akan rusak, efisiensi akan menurun, dan kinerja sistem secara keseluruhan menjadi buruk. Seberapa cepat generator merespons perubahan ini menjadi faktor penentu bagi kestabilan sistem. Oleh karena itu, stabil tidaknya mesin pembangkit sangat bergantung pada kualitas sistem kendalinya. Sebuah sistem kendali dikatakan handal apabila mampu menjaga mesin tetap berjalan normal saat menghadapi berbagai perubahan. Pada akhirnya, jika seluruh mesin di dalam jaringan mampu bertahan dan beroperasi normal meskipun terjadi gangguan, barulah sistem tersebut dikatakan benar-benar stabil (Hasibuan, 2018).

(Syahputra, et al., 2018) Secara umum, sebuah sistem tenaga listrik terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung melalui saluran transmisi untuk menyuplai listrik ke

beban. Pada sistem multimesin, aliran daya biasanya disalurkan lewat jaringan yang saling terhubung (interkoneksi). Tujuan utama dari sistem interkoneksi ini adalah untuk memastikan pasokan listrik tetap tersedia dan tidak terputus di tengah kebutuhan yang terus meningkat. Namun, sistem kelistrikan yang semakin besar dan luas juga memiliki risiko, yaitu performanya bisa menjadi lebih rentan saat terkena gangguan. Salah satu dampak dari gangguan tersebut adalah munculnya osilasi (ayunan) elektromekanik. Jika ayunan ini tidak segera diredam dengan baik, sistem dapat kehilangan kestabilannya dan berpotensi memicu masalah yang jauh lebih parah, yaitu pemadaman total (*blackout*).

Kondisi operasi sistem tenaga listrik dapat dikatakan stabil apabila terdapat keseimbangan antara daya masukan (*input*) mekanis pada penggerak mula (*prime mover*) dan daya keluaran listriknya (beban). Pada kondisi yang seimbang ini, seluruh generator akan berputar pada kecepatan yang serempak (sinkron). Keseimbangan ini hanya bisa terjaga jika setiap naik-turunnya beban selalu diikuti dengan penyesuaian daya mekanis pada *prime mover* di tiap generator. Apabila daya masukan mekanis tersebut terlambat merespons perubahan beban dan rugi-rugi jaringan, maka kecepatan putar rotor (frekuensi sistem) dan nilai tegangan akan menyimpang dari kondisi normalnya. Terlebih lagi saat terjadi gangguan, seketika akan terjadi selisih yang sangat besar antara suplai daya mekanis yang masuk dan daya listrik yang dikeluarkan oleh generator (Adriani, 2012).

Menurut (Kundur, 1994), kestabilan sistem tenaga listrik dapat diartikan sebagai kemampuan sistem dalam menjaga mesin-mesin pembangkit agar tetap beroperasi secara serempak (sinkron) pada kondisi normal, serta mampu kembali ke keadaan seimbang setelah terkena gangguan. Secara umum, masalah kestabilan pada jaringan listrik dapat dibagi menjadi tiga, yaitu kestabilan sudut (*rotor angle stability*), kestabilan frekuensi (*frequency stability*), dan kestabilan tegangan (*voltage stability*). Stabil atau tidaknya suatu sistem kelistrikan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasionalnya saat itu serta seberapa besar tingkat gangguan yang terjadi. Umumnya, sebuah sistem yang awalnya berada dalam kondisi stabil bisa langsung berubah menjadi tidak stabil (*unstable*) saat terjadi gangguan.



Gambar 1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik (Kundur, 1994).

Berdasarkan Gambar 1., kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor, kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah terjadi gangguan. Ketidakstabilan akan mengakibatkan naiknya sudut rotor yang berbeda-beda dari generator sehingga dapat mengakibatkan generator mengalami hilang sinkronisasi dengan generator lain.
2. Kestabilan frekuensi, kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan dari sistem suatu untuk mempertahankan kestabilan frekuensi akibat gangguan pada sistem yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban.
3. Kestabilan tegangan, kestabilan tegangan dapat diartikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan nilai tegangannya di semua bus pada sistem dalam kondisi operasi normal maupun setelah terjadi gangguan. Hal ini tergantung dari sistem untuk tetap mempertahankan keseimbangan antara suplai daya dan beban.

Menurut (Orytuasikal, 2022) sifat gangguan stabilitas sistem tenaga listrik dapat dibedakan menjadi:

1. Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)

Kestabilan ini adalah kemampuan jaringan kelistrikan untuk menjaga mesin-mesinnya tetap sinkron saat menghadapi gangguan berskala kecil, seperti fluktuasi (naik-turunnya) beban yang wajar. Kondisi ini sangat bergantung pada sifat berbagai komponen di dalamnya, mulai dari pembangkit, beban, jalur transmisi, hingga sistem kendalinya.

2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)

Kestabilan ini merupakan kemampuan sistem untuk kembali ke kondisi seimbang setelah terkena gangguan kecil yang berlangsung dalam kurun waktu yang cukup lama. Perhitungan dan analisis untuk kestabilan dinamis ini lebih rumit dibandingkan *steady state stability*, karena harus memasukkan respons dari komponen-komponen pengontrol otomatis.

3. Kestabilan Transien (*Transient Stability*)

Kestabilan peralihan merujuk pada kemampuan sistem untuk kembali ke titik keseimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang menyebabkan sistem kehilangan kestabilan, akibat gangguan yang melebihi kemampuan sistem untuk mengatasinya. Analisis kestabilan ini sangat penting dilakukan untuk mempelajari bagaimana sistem merespon gangguan-gangguan besar, contohnya seperti perubahan beban drastis akibat terlepasnya unit pembangkit, terjadinya hubung singkat (korsleting) pada jalur transmisi, atau proses pemutusan sakelar (*switching*).

1.6.2 Kestabilan Sudut Rotor

Menurut (Kundur, 1994), kestabilan sudut rotor (*rotor angle stability*) berkaitan dengan kemampuan mesin-mesin sinkron yang terhubung dalam suatu jaringan listrik untuk terus beroperasi secara bersamaan (sinkron), baik dalam keadaan normal maupun setelah terkena gangguan. Hal ini sangat bergantung pada keberhasilan mesin sinkron tersebut dalam menjaga atau mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanis pada seluruh mesin yang ada di dalam sistem.

Ketidakstabilan sistem dapat membuat sudut ayunan pada beberapa generator semakin membesar, yang dapat menyebabkan generator tersebut kehilangan sinkronisasi dengan generator lainnya. Kondisi lepas sinkron ini bisa terjadi antara satu mesin terhadap keseluruhan jaringan, maupun antar beberapa kelompok mesin. Oleh karena itu, agar sistem tetap stabil dan berjalan sinkron, selisih sudut rotor antar generator tidak boleh melewati batas maksimal kestabilannya, yaitu sebesar 90° . (Mumtaz, 2020).

Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua kategori, yaitu kestabilan gangguan kecil (keadaan tunak) dan kestabilan gangguan besar (keadaan transien) (Mumtaz, 2020):

1. Kestabilan Sudut Rotor Akibat Gangguan Besar

Kestabilan gangguan besar, atau yang sering disebut kestabilan transien, adalah kemampuan jaringan kelistrikan untuk tetap sinkron setelah terkena gangguan, contohnya seperti hubung singkat (korsleting) pada saluran transmisi. Saat merespons gangguan ini, akan terjadi perubahan sudut rotor generator yang cukup besar, di mana hal tersebut sangat dipengaruhi oleh hubungan daya dan sudut yang bersifat tidak linier (*non-linier*). Bertahan atau tidaknya kestabilan transien ini sangat bergantung pada kondisi operasi awal sistem dan seberapa parah tingkat gangguannya. Umumnya, bentuk ketidakstabilan yang muncul berupa pergeseran sudut yang terus membesar tanpa kembali stabil akibat kurang kuatnya torsi sinkronisasi, yang sering disebut sebagai ketidakstabilan ayunan pertama (*first swing instability*). Meskipun begitu, pada sistem kelistrikan yang sangat besar, ketidakstabilan ini tidak selalu murni karena ayunan pertama saja. Terkadang, kondisi tidak stabil tersebut merupakan hasil gabungan (superposisi) antara ayunan lambat antar-area (*interarea swing*) dan ayunan lokal (*local swing*).

2. Kestabilan Sudut Rotor Akibat Gangguan Kecil

Kestabilan gangguan kecil (*small signal stability*), merupakan kemampuan jaringan listrik untuk tetap berjalan sinkron saat menghadapi gangguan yang tergolong ringan. Karena skala gangguannya dinilai sangat kecil, proses perhitungannya bisa disederhanakan menggunakan metode persamaan linier (*linierisasi*) untuk keperluan analisis. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi dapat dari dua bentuk:

- a. Peningkatan sudut rotor karena kurangnya torsi sinkronisasi.
- b. Osilasi rotor dari peningkatan amplitudo karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

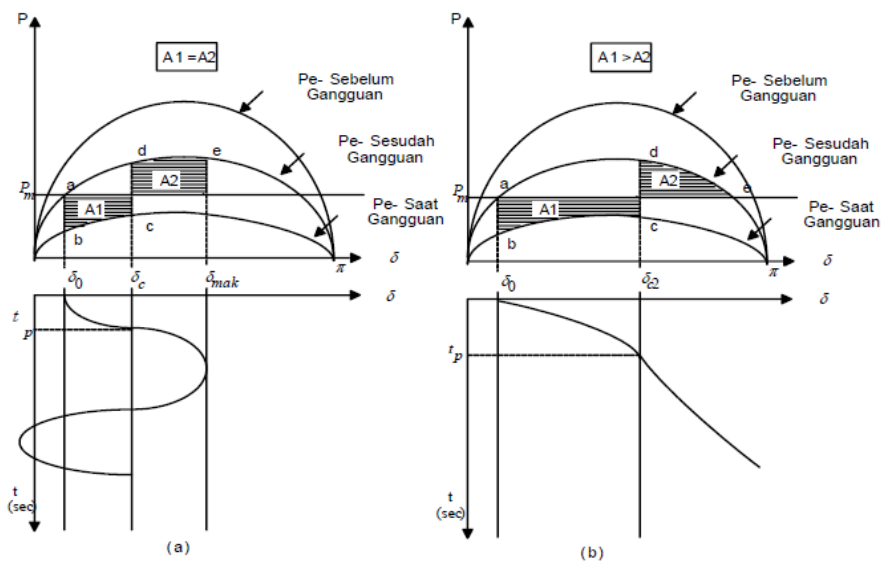
Masalah gangguan kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil dapat bersifat lokal atau global. Masalah lokal hanya memengaruhi sebagian kecil jaringan listrik, biasanya berupa ayunan (osilasi) sudut rotor dari satu pembangkit listrik tunggal yang bergerak melawan sisa sistem lainnya. Ayunan ini sering disebut sebagai osilasi mode lokal. Keberhasilan dalam meredam ayunan ini sangat bergantung pada kekuatan jaringan transmisi di sekitar pembangkit, sistem pengaturan eksitasi generator, serta keluaran daya dari pembangkit tersebut. Di sisi lain, masalah global memiliki cakupan dan dampak yang lebih luas karena melibatkan interaksi antarkelompok generator besar. Kondisi ini terjadi ketika sekelompok generator di suatu wilayah berayun melawan kelompok generator di wilayah lain, yang dikenal dengan sebutan osilasi mode antar-area (*inter-area mode*). Sifat osilasi global ini jauh lebih rumit dan sangat berbeda dibandingkan mode lokal. (Mumtaz, 2020).

1.6.3 Stabilitas Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak dalam waktu satu *swing* yang pertama. Dengan asumsi pengaturan tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja (Kumara, et al., 2016). Hal serupa juga disampaikan oleh (Saadat, 1999), yang menyatakan bahwa stabilitas transien merupakan kemampuan sistem daya untuk kembali ke kondisi sinkron setelah mengalami gangguan besar. Dengan demikian, analisis kestabilan transien selalu berkaitan erat dengan penanganan dampak dari gangguan-gangguan berskala besar. Lebih dari sekadar memantau stabil tidaknya suatu jaringan, studi kestabilan juga bertujuan untuk menghitung waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*), yakni batas waktu maksimal yang diizinkan sebelum suatu gangguan harus segera dihilangkan.

Selain melihat kondisi kestabilan sistem, studi kestabilan transien juga bertujuan untuk menentukan berapa besar waktu pemutusan kritis atau batas maksimum gangguan dihilangkan. (Stevenson & Idris, 1984) juga menambahkan bahwa, studi kestabilan transien lebih lanjut dapat dibagi ke kedalam kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multiswing*). Kestabilan ayunan pertama generator dimodelkan sederhana yaitu tanpa memasukkan sistem-sistem pengaturannya.

Periode waktu yang diselidiki adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan ada sistem seperti yang terlihat pada Gambar 2. Jika generator-generator pada sistem tetap berada dalam keadaan serempak sebelum berakhirnya detik pertama maka sistem dikatakan dalam keadaan stabil. Namun umumnya lama studi kestabilan digunakan 2 sampai dengan 3 detik agar bentuk kurva ayunan sudut rotor jelas terlihat. Untuk kestabilan ayunan majemuk meliputi periode yang lebih lama karena itu, pengaruh dari sistem-sistem pengaturan generator sudah dipertimbangkan, seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. (a) Contoh Analisis Ayunan Pertama untuk Sistem Stabil, (b) Contoh Analisis Ayunan Pertama untuk Sistem Tidak Stabil (Kundur, 1994)

Dari gambar 2. diketahui bahwa:

1. Gambar (a) (Ayunan pertama untuk sistem stabil): Mencerminkan kondisi di mana sistem dapat pulih ataupun kembali normal. Pada kondisi ini energi kinetik berlebih yang diperoleh selama percepatan (A_1) sepenuhnya diserap oleh perlambatan (A_2), hal ini menunjukkan area percepatan sama dengan area perlambatan sehingga sudut rotor akan berisolasi dan kembali ke titik keseimbangan baru di mana $A_1=A_2$.
2. Gambar (b) (Ayunan pertama untuk sistem tidak stabil): Menggambarkan situasi di mana sistem gagal pulih dan mengalami lepas sinkron. Di mana energi percepatan melampaui kemampuan sistem untuk melambat, kondisi ini dikatakan tidak stabil karena area percepatan lebih besar dari area perlambatan ($A_1>A_2$). menyebabkan sudut rotor terus meningkat tanpa batas, yang mengakibatkan hilangnya sinkronisasi atau *out-of-step* mesin.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, stabilitas transien merupakan kemampuan sistem untuk menjaga sinkronisasi selama gangguan berlangsung dan sebelum perangkat governor mulai merespons. Biasanya, ayunan pertama pada rotor mesin akan berlangsung dalam waktu satu detik setelah gangguan muncul, meski durasi pastinya sangat bergantung pada sifat mesin serta jaringan transmisi yang digunakan. Lewat dari masa satu detik tersebut, governor baru akan mulai bekerja umumnya membutuhkan waktu sekitar 4 hingga 5 detik, sehingga sistem beralih ke fase stabilitas dinamis. Adapun gerakan atau ayunan dinamis ini nantinya juga akan ikut dipengaruhi oleh naik-turunnya (osilasi) tegangan, penguatan di dalam sistem eksitasi, serta durasi pada frekuensi jaringan (Syahputra, et al., 2018).

1.6.4 Faktor yang Mempengaruhi Kestabilan

Menurut (Akbar A, et al., 2017), Kestabilan transien merupakan kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi Ketika mengalami gangguan transien. Adapun hal-hal yang mempengaruhi kestabilan sistem adalah gangguan hubung singkat, *starting* motor, pelepasan beban serta penambahan beban secara tiba-tiba.

Berbagai macam faktor dapat mempengaruhi stabilitas sistem, contohnya seperti kekuatan jaringan transmisi di dalam sistem serta saluran lain yang berada di sekitarnya. Selain itu, karakteristik pada unit pembangkit termasuk inersia (kelembaman) pada peralatan yang berputar serta sifat elektrik seperti reaktansi transien dan saturasi magnetik pada besi stator dan rotor juga turut berpengaruh. Faktor penting lainnya adalah kecepatan alat atau perlengkapan yang digunakan untuk memutus aliran saat terjadi gangguan (*disconnect*), serta fitur penutupan kembali otomatis (*reclosing*) yang menentukan seberapa cepat jalur transmisi bisa kembali beroperasi. Sama halnya dengan stabilitas *steady-state*, kecepatan respons dari sistem eksitasi generator memegang peran penting dalam menjaga stabilitas transien (Hasibuan, 2018). Adapun Faktor-faktor utama yang mempengaruhi stabilitas adalah:

1. Faktor mekanis, dapat berupa:
 - a. Torsi *input prime* beban.
 - b. Inersia dari *prime mover* dan generator.
 - c. Inersia motor dan sumbu beban.
 - d. Torsi *input* sumbu beban.
2. Torsi elektrik, berupa:
 - a. Tegangan internal dari generator sinkron.
 - b. Reaktansi sistem.

Situasi yang lebih besar juga dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik, misalnya saat unit pembangkit atau beban besar tiba-tiba terlepas dari sistem, atau

ketika terjadi gangguan pada jalur transmisi. Dalam situasi seperti ini, tingkat kestabilan harus cukup kuat untuk menahan kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang tergolong besar tersebut. Begitu pembangkit atau beban besar hilang secara mendadak, keseimbangan antara energi masukan (*input*) dan keluaran (*output*) listrik di dalam sistem akan langsung terganggu. Apabila energi masukan tidak lagi mencukupi, kelembaman (*inersia*) rotor pada mesin-mesin yang masih aktif akan membuat putarannya melambat dalam waktu singkat. Sebaliknya, jika beban yang hilang, maka energi masukan pada sistem akan melebihi beban listriknya, sehingga mesin akan berputar semakin cepat (Hasibuan, 2018).

1.6.5 Pemodelan Sistem Multimesin

Analisis stabilitas sistem multimesin biasanya menggunakan skenario gangguan tiga fasa simetris. Jenis gangguan ini dipilih dalam analisis kestabilan peralihan (*transient*) karena memberikan dampak yang paling ekstrem terhadap sistem tenaga listrik, di mana arus gangguan yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan dengan gangguan satu atau dua fasa. Oleh sebab itu, pengujian stabilitas transien pada sistem multimesin sengaja memperhitungkan jenis gangguan yang dampaknya paling berat. Alasan inilah yang membuat analisis kestabilan pada sistem multimesin menjadi jauh lebih kompleks dan rumit jika dibandingkan dengan analisis pada sistem mesin tunggal bus tak berhingga atau SMIB (*Single Machine Infinite Bus*) (Prasetyo, et al., 2024).

Menurut (Adriani, 2012), Sistem multimesin merupakan sistem tenaga listrik yang terdiri dari banyak mesin-mesin (generator sinkron) dan saling interkoneksi satu sama lain. Untuk mengurangi kerumitan/kompleksitas dari analisis stabilitas transien maka dibuat penyederhanaan dengan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Setiap mesin sinkron direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstan yang terhubung seri dengan reaktansi transien. Representasi ini mengabaikan efek saliensi dan mengasumsikan fluks bocor konstan.
2. Aksi governor diabaikan dan masukan daya mekanis diasumsikan selalu konstan selama keseluruhan periode simulasi.
3. Semua beban diubah menjadi admitansi ke *ground* dan diasumsikan konstan.
4. Redaman atau daya asinkron diabaikan.

1.6.6 Load flow

Menurut (Handoko, et al., 2023), Analisis aliran daya (*load flow analysis*) merupakan studi yang dilakukan untuk mengetahui kondisi aliran listrik di dalam suatu sistem tenaga listrik saat beroperasi dalam keadaan tunak (*steady state*). Parameter utama yang diperoleh dari analisis ini meliputi nilai tegangan di setiap bus, besarnya daya aktif dan reaktif yang mengalir melalui berbagai komponen sistem, serta persentase perbandingan antara tegangan bus dengan tegangan ratingnya. Studi ini sangat dibutuhkan, baik dalam perencanaan awal instalasi jaringan maupun saat terjadi perubahan konfigurasi sistem. Hal ini dikarenakan setiap penambahan atau pengurangan komponen akan mengubah distribusi aliran daya pada komponen lainnya, yang berpotensi memicu gangguan operasional seperti tegangan berlebih (*overvoltage*) atau tegangan turun (*undervoltage*).

Melalui *load flow analysis*, dapat diketahui nilai tegangan dan sudut fase tegangan saat sistem berada dalam kondisi *steady-state*. Informasi ini penting untuk memastikan bahwa tegangan, terutama pada *busbar*, masih berada dalam batas yang sesuai dengan standar seperti ANSI atau IEC. Selain itu, analisis ini juga memungkinkan perbandingan antara tegangan aktual dan tegangan yang seharusnya, sehingga besarnya rugi-rugi

(losses) dalam sistem dapat dihitung (Handoko, et al., 2023).

Pada konsep perhitungan aliran daya dalam penyelesaian (perhitungan) sebuah aliran daya, sistem dioperasikan dalam kondisi/keadaan tunak dan keadaan seimbang. Setiap bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif P , daya reaktif Q , besar tegangan $|V|$, dan sudut fasa tegangan δ . Jadi ada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P , Q , $|V|$, dan δ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui dan dua yang lainnya perlu dicari (Darwis, 2022).

(Handoko, et al., 2023) juga menambahkan bahwa, tujuan utama dari studi aliran daya adalah untuk menentukan besarnya (magnitudo) tegangan, sudut fasa tegangan, aliran daya aktif dan reaktif pada jaringan, serta rugi-rugi daya yang muncul di dalam sistem tenaga listrik. Dalam menyelesaikan analisis aliran daya (*load flow analysis*), terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, di mana salah satu yang paling umum adalah metode Newton-Raphson. Sebelum melakukan perhitungan tersebut, penting untuk memahami klasifikasi *busbar* (bus) dalam sistem tenaga listrik, yang umumnya dibagi menjadi:

1. PQ Bus atau *Load Bus*

PQ Bus merupakan *busbar* yang terkoneksi langsung dengan beban sistem. Pada PQ Bus nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) diketahui sedangkan nilai tegangan ($|V|$) dan sudut fase tegangan (δ) tidak diketahui.

2. PV Bus atau *Generator Bus* atau *Voltage-Controlled Bus*

PV Bus merupakan *busbar* yang terkoneksi langsung dengan komponen pembangkitan daya seperti generator. Pada PV Bus nilai daya aktif (P) dan tegangan ($|V|$) diketahui sedangkan daya reaktif (Q) dan sudut fase tegangan (δ) tidak diketahui.

3. *Swing Bus* atau *Slack Bus* atau *Reference Bus*

Slack Bus merupakan *busbar* yang terkoneksi dengan pembangkit berdaya sangat besar seperti *power grid* atau terhubung dengan banyak generator (*infinite bus*). Daya yang sangat besar menjadikan *slack bus* memiliki tegangan dan frekuensi yang konstan terlepas dari seberapa banyak daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang diserap atau diberikan pada *slack bus*, dimana daya aktif P dan daya reaktif Q akan dicari dalam perhitungan.

1.6.6.1 Newton-Raphson Power Flow Solution

Menurut (Sallam & Malik, 2015), metode Newton-Raphson dikembangkan dari Deret Taylor dengan menyederhanakan persamaan, yaitu dengan mengabaikan turunan tingkat pertama pada fungsi satu variabel. Metode ini memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan metode Gauss-Seidel, terutama untuk sistem yang besar, karena lebih efisien dan praktis. Jumlah iterasi yang diperlukan untuk mendapatkan solusi bergantung pada ukuran sistem yang dianalisis. Dalam penerapannya, persamaan aliran daya pada metode ini dinyatakan dalam bentuk polar.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (1)$$

Persamaan diatas bila ditulis dalam bentuk polar adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2)$$

Daya kompleks pada bus i adalah:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (3)$$

Substitusi dari persamaan (2) untuk I_i ke dalam persamaan (3) menghasilkan:

$$P_i + jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (4)$$

Pisahkan bagian real dan imajiner:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (5)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (6)$$

Di mana,

I_i adalah arus pada bus ke- i .

Y_{ij} adalah nilai admitansi kompleks antara bus i dan bus j .

V_j adalah tegangan pada bus ke- j .

$|Y_{ij}|$ adalah magnitudo admitansi antara bus i dan bus j .

$|V_j|$ adalah magnitudo tegangan di bus j .

θ_{ij} adalah sudut fasa dari admitansi Y_{ij} .

δ_j adalah sudut fase tegangan di bus j .

P_i adalah daya aktif pada bus i .

jQ_i adalah daya reaktif pada bus i (imajiner).

V_i adalah tegangan di bus i .

I_i^* adalah konjugat kompleks dari arus I_i .

Persamaan (5) dan (6) membentuk persamaan aljabar nonlinier dengan variabel sendiri. Besarnya setiap variable dinyatakan dalam satuan per unit dan untuk sudut fasa dinyatakan dalam satuan radian. Dalam hal ini bus 1 diumapamakan sebagai *slack bus*. Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan pada sudut tegangan ($\Delta\delta_i^{(k)}$) dan besarnya tegangan ($\Delta|V_i^{(k)}|$) dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (7)$$

Di mana,

ΔP adalah selisih (*mismatch*) daya aktif pada setiap bus selama proses iterasi.

ΔQ adalah selisih (*mismatch*) daya reaktif pada setiap bus selama proses iterasi.

$\Delta\delta$ adalah koreksi sudut fasa tegangan pada setiap bus.

$\Delta|V|$ adalah koreksi magnitudo tegangan pada setiap bus.

$J_1 - J_4$ adalah elemen-elemen matriks Jacobian.

Solusi ini merupakan solusi perkiraan karena suku turunan orde lebih tinggi dari deret Taylor diabaikan. Oleh karena itu, solusinya juga merupakan perkiraan, yaitu bukan solusi sebenarnya. Akibatnya, diperlukan iterasi lebih lanjut. Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_1 adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (9)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk nilai J_2 adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (10)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (11)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk nilai J_3 adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (12)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (13)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk nilai J_4 adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (14)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (15)$$

Harga dari daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$) berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, dan ini disebut sisa daya (*power residuals*) yang diberikan dengan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (16)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (17)$$

Di mana,

$\Delta P_i^{(k)}$ adalah sisa daya aktif (*mismatch* daya aktif) pada bus i pada iterasi ke- k .

P_i^{sch} adalah daya aktif yang dijadwalkan / ditentukan (*specified power*).

$P_i^{(k)}$ adalah daya aktif hasil perhitungan pada iterasi ke- k .

$\Delta Q_i^{(k)}$ adalah sisa daya reaktif (*mismatch* daya reaktif) pada bus i pada iterasi ke- k .

Q_i^{sch} adalah daya reaktif yang dijadwalkan.

$Q_i^{(k)}$ adalah daya reaktif hasil perhitungan iterasi ke- k .

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad \text{dan} \quad |V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (18)$$

Di mana,

$\delta_i^{(k+1)}$ adalah nilai sudut fasa tegangan yang diperbarui.

$\delta_i^{(k)}$ adalah nilai sudut fasa tegangan bus i pada iterasi ke- k .

$\Delta \delta_i^{(k)}$ adalah nilai koreksi/perubahan sudut terbaru dari hasil perhitungan Jacobian.

$|V_i^{(k+1)}|$ adalah nilai tegangan yang diperbarui.

$|V_i^{(k)}|$ adalah besar tegangan bus i pada iterasi ke- k .

$\Delta |V_i^{(k)}|$ adalah nilai koreksi/perubahan tegangan terbaru.

1.6.7 Persamaan Ayunan

Langkah awal dalam melakukan analisis kestabilan sistem tenaga listrik adalah menyusun model matematika yang mampu menggambarkan dinamika sistem saat menghadapi gangguan besar. Pada unit pembangkit listrik, model matematika yang digunakan adalah persamaan ayunan (*swing equation*). Persamaan ayunan ini berfungsi untuk memodelkan dan mengatur pergerakan mekanis dari rotor mesin sinkron (serempak) berdasarkan prinsip dasar hukum dinamika rotasi yang menyatakan “Momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali momen kelembaban (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya” (Rosalina, 2010).

Penggerak mula (*prime mover*) pada mesin sinkron menyuplai torsi mekanis T_m ke poros mesin, sedangkan dari sisi kelistrikan akan muncul torsi elektrik atau elektromagnetik T_e . Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3, arah kerja torsi mekanis dan torsi elektrik saling berlawanan. Apabila terjadi suatu gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan, baik torsi mekanis menjadi lebih besar daripada torsi elektromagnetik maupun sebaliknya, maka rotor akan mengalami torsi percepatan bersih (*net accelerating torque*). Besarnya nilai percepatan inilah yang nantinya menentukan kekuatan dan kemampuan sistem untuk bertahan demi menjaga kestabilan transien. Adapun metode tersebut adalah sebagai berikut (Mumtaz, 2020):

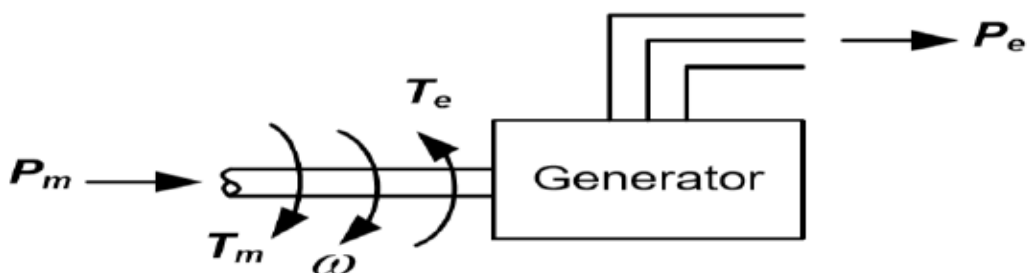
$$T_a = T_m - T_e \quad (19)$$

Di mana,

T_a adalah torsi percepatan.

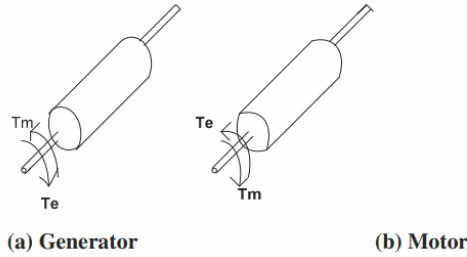
T_m adalah torsi mekanis.

T_e adalah torsi elektromagnetis.



Gambar 3. Representasi Daya Mekanik dan Daya Listrik pada Sebuah Generator (Mumtaz, 2020).

Berdasarkan prinsip dasar dinamika, momen putar percepatan suatu mesin sinkron (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen kelembaban (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dimana jika T_m dan T_e dianggap positif untuk generator serempak berarti bahwa T_m adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah yang positif. Prinsip dasar ini diilustrasikan pada Gambar 4. Yang tertera di halaman selanjutnya. Untuk generator yang bekerja dalam keadaan diam maka $T_m = T_e$, dalam keadaan ini tidak ada percepatan ataupun perlambatan terhadap massa rotor, sedang kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Bila terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan yaitu ketika $T_m > T_e$ atau perlambatan $T_m < T_e$.



Gambar 4. Representasi Suatu Rotor Mesin yang Membandingkan Arah Perputaran serta Medan Putar Mekanis dan Elektris (Mumtaz, 2020).

Generator sinkron yang bekerja dalam keadaan *steady-state* akan berputar pada kecepatan sinkron ω_{sm} sehingga T_m sama dengan T_e sedangkan momen putar T_a sama dengan nol. Pada persamaan (20), θ_m diukur terhadap sumbu yang diam dan untuk mengukurnya terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron adalah dengan persamaan:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (20)$$

Di mana,

ω_m adalah kecepatan sudut rotor.

$\frac{d\theta_m}{dt}$ adalah turunan sudut rotor terhadap waktu.

ω_{sm} adalah kecepatan sinkron pada mesin.

δ_m adalah pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dalam kecepatan serempak.

Dari prinsip dinamika dasar, daya adalah sama dengan kecepatan sudut dikali momen putar maka persamaan daya dapat ditulis sebagai berikut:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (21)$$

Di mana,

J adalah momen inersia pada rotor.

ω_m adalah kecepatan sudut rotor.

$\frac{d^2\delta_m}{dt^2}$ adalah percepatan sudut rotor.

P_m adalah daya mekanis input.

P_e adalah daya listrik keluaran.

P_a adalah daya percepatan.

Selanjutnya terdapat juga konstanta Momen, Momen ini dinyatakan dengan M dan disebut dengan konstanta kelembaman (*Inertia Constant*) dari mesin tersebut. M yang dinyatakan dalam joule-detik per-radian dan persamaan (22) dapat dituliskan dengan:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (22)$$

Di mana,

M adalah konstanta inersia (momentum).

Data-data dinamis mesin yang diperlukan dalam studi kestabilan, suatu konstanta yang berhubungan dengan kelembaman akan diberikan, konstanta tersebut dinamakan konstanta H dan didefinisikan:

$$H = \frac{\text{Daya kinetis yang disimpan dalam mega joule pada kecepatan sinkron}}{\text{Rating Mesin dalam MVA}}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{sm}^2}{S_b} = \frac{\frac{1}{2}M\omega_{sm}}{S_b} = \frac{\omega_k}{S_b} \quad (23)$$

Di mana,

H adalah konstanta inersia.

ω_k adalah energi kinetik yang tersimpan.

S_b adalah daya basis/rating mesin.

Selanjutnya diperoleh juga persamaan sebagai berikut:

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (24)$$

Kecepatan sinkron pada persamaan (24) jika dituliskan dalam satuan-satuan listrik-listrik maka diperoleh:

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (25)$$

Penggunaan subkrib pada ω , ω_s , dan δ menunjukkan bahwa yang digunakan adalah satuan-satuan mekanis, jika tidak maka yang dimaksudkan adalah satuan-satuan listrik. Selanjutnya, sistem dengan frekuensi sebesar f Hz dan δ dinyatakan dalam radian listrik, persamaan (26) menjadi:

$$\frac{H}{\pi \cdot f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (26)$$

Bila δ dinyatakan dalam derajat listrik:

$$\frac{H}{180 \cdot f} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (27)$$

Di mana,

f adalah frekuensi sistem (Hz).

Persamaan (27) merupakan persamaan ayunan (*swing equation*) mesin, dimana persamaan dasar ini yang mengatur dinamika (gerak) putaran mesin sinkron dalam studi kestabilan. Kita lihat bahwa persamaan tersebut adalah persamaan diffrensial orde dua yang dapat dituliskan menjadi dua buah persamaan orde satu dengan ω , ω_s . Dimana Grafik dalam penyelesaian persamaan diatas disebut kurva ayunan (*swing curve*) mesin, dan dengan meneliti kurva ayunan semua mesin dalam sistem daya yaitu diselesaikan dalam besaran δ terhadap waktu, maka akan terlihat grafik penyelesaian mesin akan tetap serempak sekalipun terjadi gangguan.

Penggunaan konstanta kelembaman M jarang digunakan dalam praktek, sedangkan yang lebih sering digunakan adalah bentuk-bentuk persamaan ayunan yang menggunakan konstanta H . Menurut (Stevenson & Idris, 1984), hal tersebut dikarenakan nilai M banyak sekali berubah-ubah menurut besar dan jenisnya, sedangkan nilai H

sedikit sekali berubahnya.

Dalam analisis kestabilan sistem interkoneksi skala besar (banyak mesin), jumlah persamaan ayunan dapat disederhanakan apabila gangguan yang terjadi memicu generator-generator di dalam suatu stasiun pembangkit untuk berayun secara bersamaan (koheren). Mesin-mesin dalam pembangkit tersebut dapat digabungkan menjadi satu mesin ekuivalen, seakan-akan rotornya terangkai secara mekanis, sehingga hanya memerlukan satu persamaan ayunan tunggal. (Kothari & Nagrath, 2011).

1.6.8 Metode Perhitungan Runge-Kutta Orde 4

Menurut (Adriani, 2012), kondisi peralihan (transien) pada sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan dimodelkan melalui persamaan diferensial. Untuk menyelesaikan persamaan tersebut, salah satu pendekatan numerik yang sering digunakan adalah Metode Runge-Kutta Orde 4. Metode ini dikembangkan dengan keunggulan mampu menghindari perhitungan turunan (derivatif) tingkat tinggi yang rumit. Sebagai pengganti komponen turunan tersebut, metode ini memanfaatkan evaluasi nilai fungsi $f(x,y)$ di beberapa titik sampel tertentu, yang secara prinsip kerja mampu menghasilkan tingkat akurasi yang setara dengan persamaan Taylor. Adapun untuk menentukan nilai $x(t)$, tentukan terlebih dahulu empat konstanta berikut:

$$k_1 = f(t_i, x_i) \Delta t \quad (28)$$

$$k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_i + \frac{1}{2}k_1\right) \Delta t \quad (29)$$

$$k_3 = f\left(t_i + \frac{1}{2}\Delta t, x_i + \frac{1}{2}k_2\right) \Delta t \quad (30)$$

$$k_4 = f(t_i + \Delta t, x_i + k_3) \Delta t \quad (31)$$

Di mana,

x_i adalah nilai variabel keadaan (*state variable*) pada langkah ke- i .

t_i adalah waktu pada iterasi atau langkah ke- i .

Δt adalah interval waktu simulasi (*time step*).

k_1 adalah estimasi gradien awal pada titik (t_i, x_i) .

k_2 adalah estimasi gradien di tengah interval menggunakan k_1 .

k_3 adalah estimasi gradien kedua di tengah interval menggunakan k_2 .

k_4 adalah estimasi gradien pada akhir interval menggunakan k_3 .

Sehingga algoritma perhitungan untuk nilai x berturut-turut dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$X_{i+1} = X_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (32)$$

Di mana,

X_{i+1} adalah nilai variabel keadaan pada langkah berikutnya.

1.6.9 Reduksi Matriks Admitansi (*Kron Reduction*)

Menurut (Dewantara & Sulistiawati, 2018), eliminasi variabel pada dasarnya identik dengan proses reduksi jaringan, karena metode ini menghasilkan rangkaian ekuivalen dengan orde yang lebih rendah melalui penyederhanaan simpul (*node*) di setiap tahapannya. Melalui penomoran bus secara selektif, kita dapat menerapkan eliminasi ini untuk memperkecil dimensi matriks admitansi bus Y_{bus} . Matriks koefisien yang dihasilkan

dari rangkaian persamaan tersebut nantinya akan merepresentasikan Y_{bus} baru untuk jaringan ekivalen yang hanya berisi bus-bus pilihan yang ingin dipertahankan, sedangkan bus lainnya dihilangkan. Pengurangan matriks ini secara signifikan meningkatkan efisiensi perhitungan komputasi dan membantu analisis agar langsung terfokus pada bagian jaringan yang menjadi prioritas utama. Berikut adalah formula umum dari proses eliminasi atau reduksi Y_{bus} (Reduksi Kron):

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Di mana,

Y_{ii} adalah admitansi diri (*self admittance*) pada bus ke- i .

Y_{ij} adalah elemen matriks admitansi bus yang menyatakan hubungan admitansi antara bus ke- i dan bus ke- j .

V_i adalah tegangan pada bus ke- i .

I_i adalah arus injeksi pada bus ke- i .

Dari matriks diatas akan mengeliminasi node 1, sehingga matriks admitansi menjadi 3x3.

$$\begin{bmatrix} Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (34)$$

Di mana,

$Y_{22}, Y_{23}, \dots, Y_{44}$ adalah elemen-elemen matriks admitansi bus yang baru.

V_2, V_3, V_4 adalah nilai tegangan kompleks pada bus nomor 2, 3 dan 4.

I_2, I_3, I_4 adalah nilai arus yang masuk/keluar pada bus nomor 2, 3 dan 4.

Untuk menghitung elemen elemen bus yang baru di reduksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$Y_{jk (new)} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}} \quad (35)$$

Di mana,

$Y_{jk (new)}$ adalah nilai admitansi terbaru untuk elemen yang berada di baris j dan kolom k setelah proses eliminasi dilakukan.

Y_{jk} adalah nilai admitansi lama (sebelum eliminasi) untuk elemen di baris j , kolom k .

Y_{jp} adalah nilai admitansi lama yang berada pada baris j dan berpotongan dengan kolom p (kolom dari bus yang sedang dieleminasi).

Y_{pk} adalah nilai admitansi lama yang berada pada baris p (baris dari bus yang sedang dieliminasi) dan berpotongan dengan kolom k .

Y_{pp} adalah nilai admitansi diagonal utama dari bus yang akan dieliminasi (baris p dan kolom p). Elemen ini menjadi nilai pembagi (denominator).

Dimana j merupakan kolom, p merupakan jumlah bus, sedangkan pada k merupakan jumlah baris. Dalam menentukan reduksi matriks menggunakan kron reduksi tentu saja harus menentukan bus admitansi sistem awal terlebih dahulu.

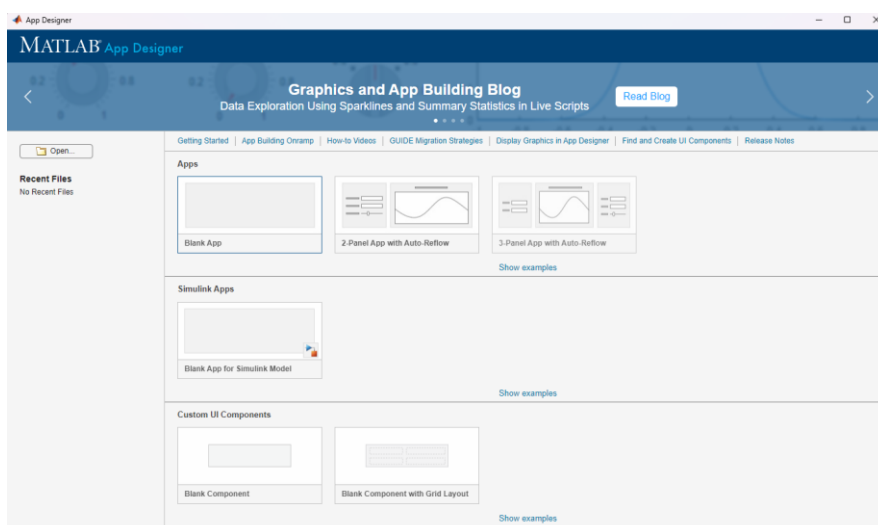
(Prasetyo, et al., 2024) juga menambahkan bahwa dalam studi stabilitas multi

mesin (m -buah generator dan n -bus) membutuhkan penyederhanaan/pengurangan pada matriks Y -bus sistem tenaga, sehingga analisis kestabilan sistem dapat dilakukan. Pada dasarnya, suatu jaringan kelistrikan terinterkoneksi dengan konfigurasi m generator dan n bus akan memiliki matriks Y_{bus} awal berdimensi $n \times n$. Proses penyederhanaan matriks tersebut dilakukan melalui metode Reduksi Kron (*Kron's reduction*), yang pada akhirnya akan menghasilkan matriks ekuivalen baru berdimensi $m \times m$, di mana ukurannya menyesuaikan dengan jumlah generator yang ada di dalam sistem.

1.6.10 Graphical User Interface (GUI)

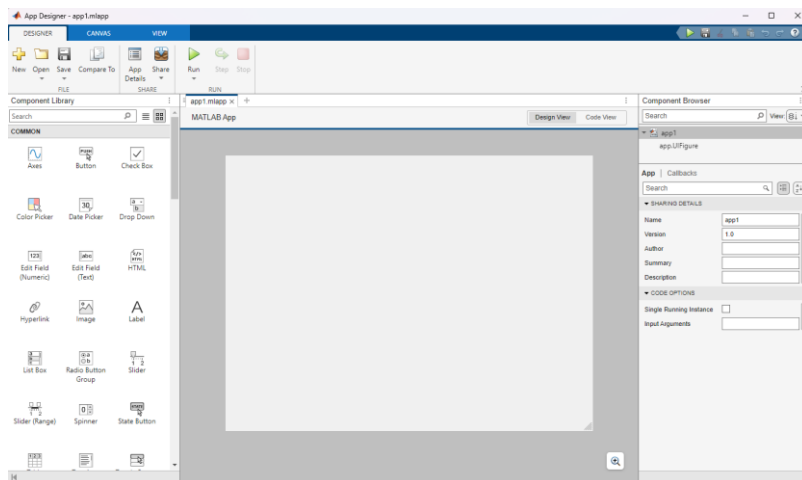
Menurut (Prihastomo & Winanti, 2024), *Graphical User Interface* (GUI) merupakan sistem antarmuka yang memfasilitasi interaksi antara pengguna dan perangkat lunak melalui elemen-elemen visual, seperti ikon, tombol, jendela, dan menu. Penerapan GUI ini bertujuan untuk menghadirkan pengalaman pengguna (*user experience*) yang lebih intuitif dan praktis jika dibandingkan dengan antarmuka berbasis teks atau baris perintah (*command line*). Dalam ranah desain industri, antarmuka grafis ini diaplikasikan pada perangkat lunak yang berfungsi untuk merancang, menguji, serta menyimulasikan produk fisik, sehingga proses visualisasi desain menjadi jauh lebih mudah. Sementara itu, pengujian antarmuka (*GUI testing*) dilakukan dengan cara mengevaluasi aplikasi melalui serangkaian interaksi langsung pada komponen visualnya, seperti mengklik tombol, memasukkan teks, atau menavigasi menu pilihan (*pull-down menu*) pada widget yang tersedia.

GUI memungkinkan pengguna dapat lebih mudah dan juga lebih nyaman dalam menjalankan sebuah *software*. (Muhtadi, et al., 2019) menambahkan, agar dapat menghasilkan antarmuka (*Graphical User Interface*/GUI) yang ideal, proses pengujian wajib dilakukan secara menyeluruh selama tahap pengembangan *software*. Tingkat kerumitan (kompleksitas) sebuah GUI akan berdampak langsung pada berbagai faktor saat terjadinya interaksi antara pengguna dan sistem, salah satunya adalah waktu respons (*response time*). Saat ini, telah tersedia berbagai macam perangkat (*tools*) yang dapat dimanfaatkan untuk memfasilitasi perancangan dan pengujian GUI tersebut, yang salah satunya adalah MATLAB.



Gambar 5. Tampilan App Designer

Gambar 5. menunjukkan beberapa pilihan yang dapat dipilih oleh pengguna untuk memulai dari halaman yang telah terisi atau kosong. Untuk tujuan memudahkan, ada juga opsi untuk membuka *file* yang telah dibuat sebelumnya. Setelah memilih lembar kosong, pengguna akan melihat tampilan yang mirip dengan Gambar 6.

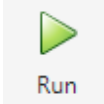


Gambar 6. Tampilan *Homepage*

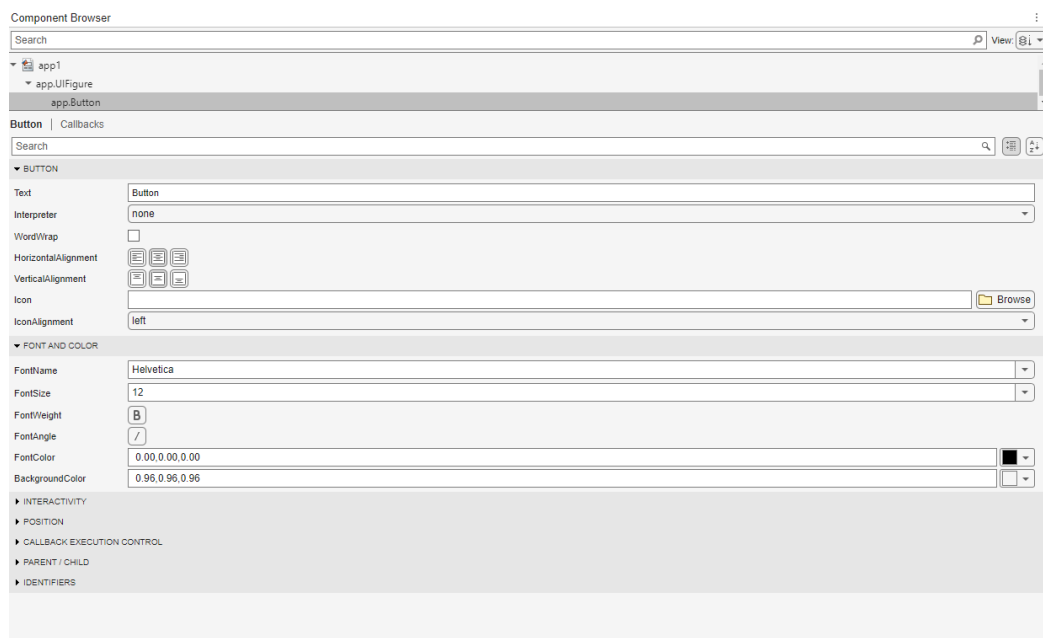
Gambar 6. menunjukkan tampilan *homepage* App Designer yang memiliki berbagai fungsi seperti yang tertera pada tabel dibawah ini:

Tabel 1. Fungsi Ikon pada *Homepage* App Designer

No.	Ikon	Nama	Fungsi
1.	 Axes	Axes	Digunakan sebagai tempat untuk menampilkan grafik, plot, atau gambar. Axes merupakan objek grafis untuk memanggil fungsi seperti <i>plot()</i> , <i>surf()</i> , atau fungsi visualisasi data MATLAB lainnya
2.	 Button	Button	Digunakan untuk memicu suatu tindakan atau menjalankan kode tertentu ketika diklik. Misalnya, tombol untuk menghitung, menyimpan data, atau memulai proses simulasi. Kode yang dijalankan didefinisikan dalam <i>callback function</i> .
3.	 Drop Down	Drop down	Menyediakan daftar pilihan di mana pengguna dapat memilih satu opsi dari beberapa item yang telah ditentukan. Berguna untuk membatasi masukan pengguna pada nilai-nilai yang valid. Ketika nilai berubah, <i>callback function</i> dapat dipicu.
4.	 Label	Label	Digunakan untuk menampilkan teks statis di UI. Biasanya digunakan untuk melabeli komponen <i>input</i> lain (seperti <i>Edit Field</i> atau <i>Drop Down</i>), memberikan judul, atau menampilkan informasi umum yang tidak perlu diubah oleh pengguna.

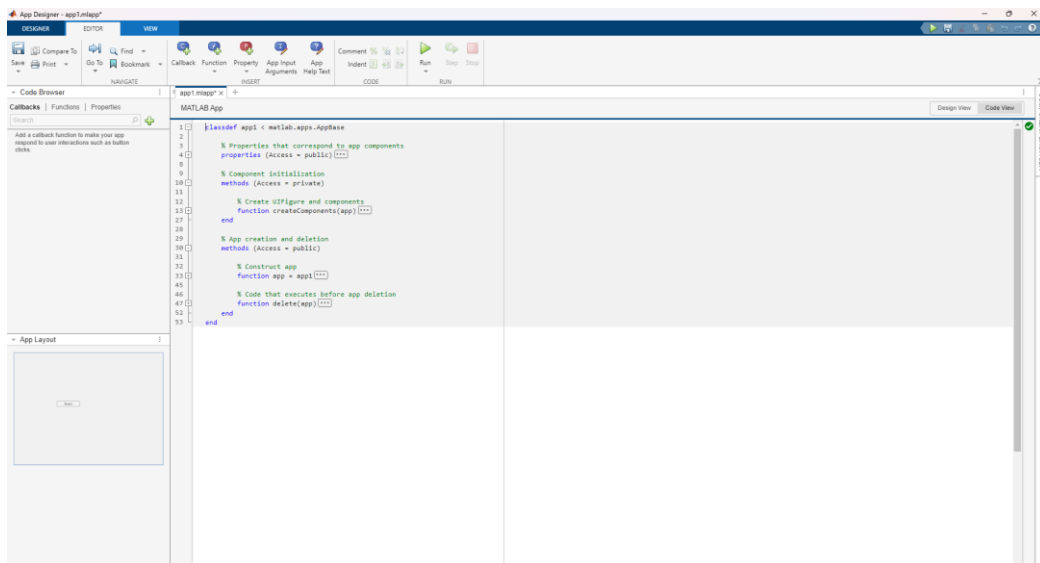
No.	Ikon	Nama	Fungsi
5.		<i>Image</i>	Digunakan untuk menampilkan gambar, logo, atau ikon di dalam aplikasi, dimana elemen <i>image</i> ini memudahkan untuk memasukkan gambar ke dalam desain yang akan dibuat.
6.		<i>Edit Field (Numeric)</i>	Digunakan untuk memasukkan atau mengedit nilai numerik (angka). MATLAB secara otomatis akan memvalidasi masukan untuk memastikan nilainya adalah angka dan menolak masukan yang bukan angka (misalnya, teks).
7.		<i>Run</i>	Digunakan untuk menjalankan dan menguji aplikasi yang sedang dibuat. Ketika tombol ini diklik, <i>App Designer</i> akan mengompilasi kode dan meluncurkan aplikasi UI sebagai jendela terpisah.

Adapun fungsi yang dapat membuat penanda pada suatu properti dan juga dapat membuat variasi ukuran tulisan, warna, dan lain lain seperti pada Gambar 7.



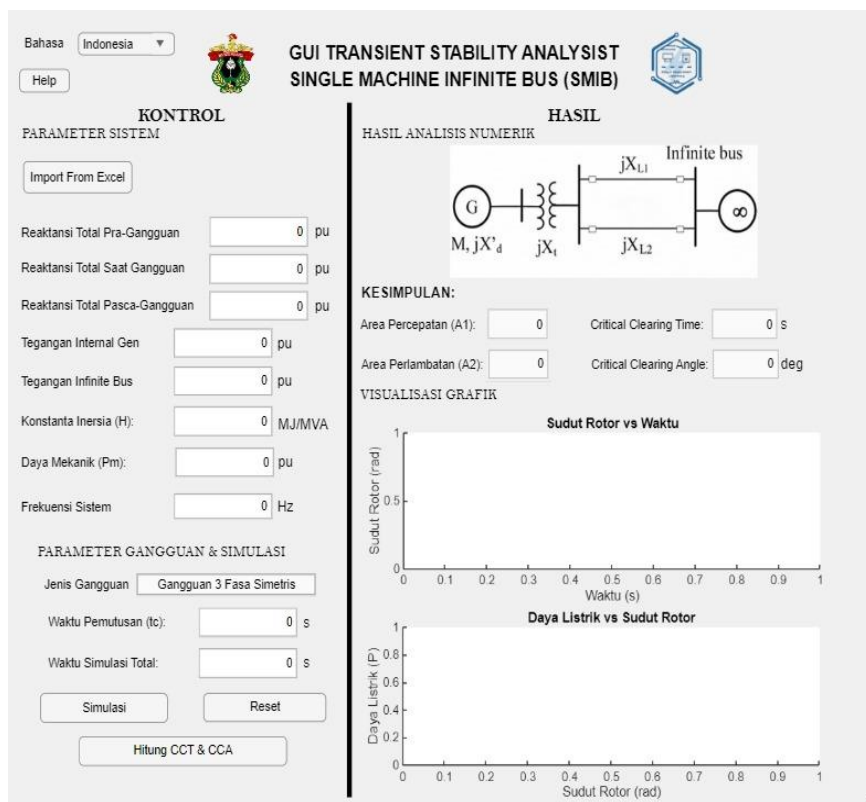
Gambar 7. Tampilan Fungsi *Button*

Setelah itu, pada tampilan *property* dapat menambahkan kode melalui tampilan, yang memungkinkan properti GUI bekerja seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Tampilan *Property* pada GUI

Gambar 9. memperlihatkan contoh hasil desain dan pemrograman yang telah dibuat di penelitian sistem sebelumnya untuk sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB):



Gambar 9. Tampilan GUI *Transient* SMIB

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam jangka waktu dari bulan Desember 2025 hingga bulan Mei 2026. Dalam penelitian ini akan merancang algoritma dan GUI untuk *software* analisis stabilitas transien sistem multimesin melalui MATLAB yang perancangan dan pengujian *software* dilakukan di Laboratorium Relay dan Pengukuran, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.

2.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah satu unit laptop dengan *Software Matrix Laboratory* (MATLAB) R2024b dengan fitur APPDESIGNER yang berfungsi untuk membuat *software* berbasis GUI. Bahan yang digunakan adalah data teknis sistem tenaga listrik seperti parameter beban, generator, saluran serta mesin pada sistem multimesin 3 Generator 6 Bus serta studi kasus gangguan pada kestabilan sudut rotor.

2.3 Alur Penelitian Penelitian

Berikut ini adalah alur penelitian yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Studi literatur

Tahapan ini mencakup pengumpulan dan pengkajian referensi dari buku, jurnal, dan dokumentasi terkait. Tujuannya adalah memperkuat landasan teori mengenai analisis stabilitas transien sistem multimesin, formulasi metode numerik yang digunakan, serta prinsip dasar perancangan *Graphical User Interface* (GUI).

2. Perancangan *software*

Tahap ini difokuskan pada pembuatan desain antarmuka pengguna (GUI) menggunakan fitur *App Designer* pada MATLAB R2024b. Prosesnya meliputi pengaturan tata letak untuk parameter masukan (seperti data bus, saluran, mesin dan generator) serta penyiapan elemen visual keluaran berupa grafik kurva ayunan dan tabel hasil perhitungan.

3. Implementasi dan Integrasi Algoritma

Pembuatan skrip MATLAB untuk perhitungan stabilitas transien sistem multimesin dan penerapan algoritma analisis stabilitas transien dengan metode perhitungan Newton-Raphson, Reduksi Kron, Runge-Kutta Orde 4 (RK4) serta Persamaan Ayunan lalu mengintegrasikan skrip dan algoritma dengan GUI.

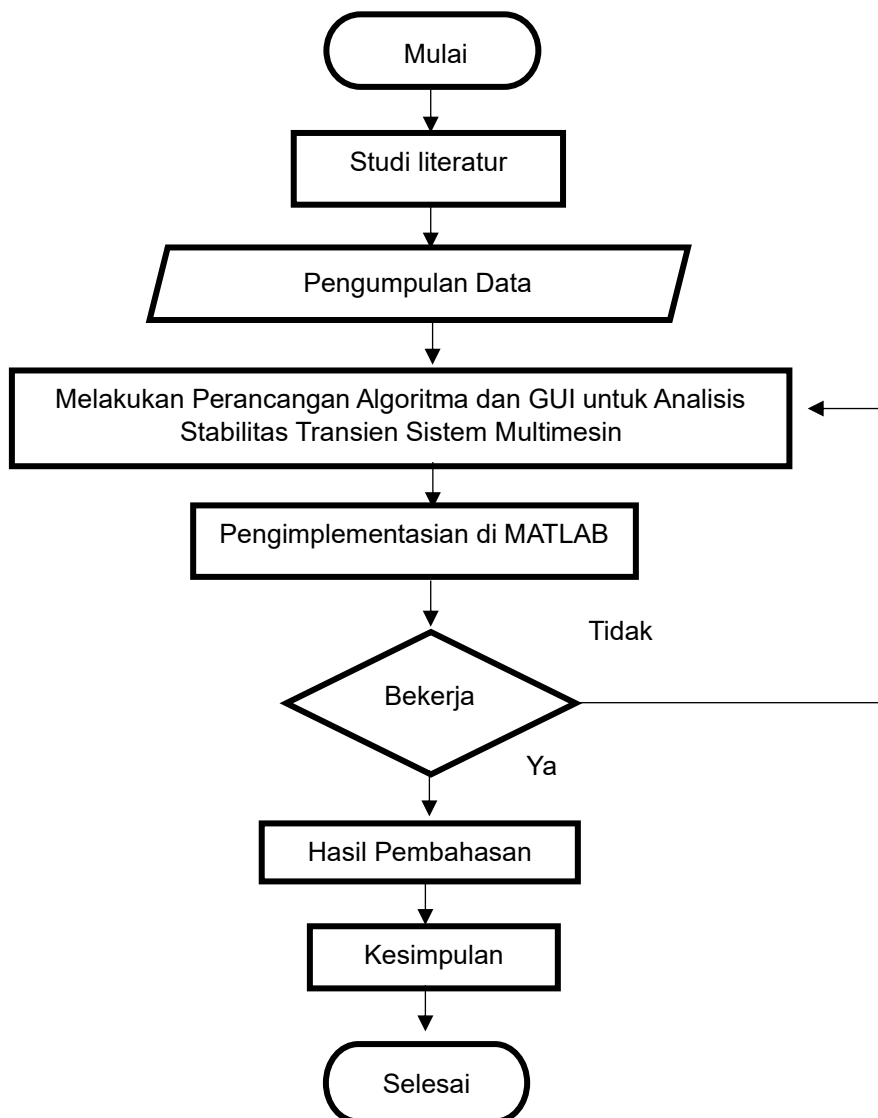
4. Pengujian *Software*

Software yang telah selesai diintegrasikan kemudian diuji untuk memvalidasi akurasi dengan referensi. Pengujian dilakukan dengan menyimulasikan berbagai skenario lokasi gangguan pada sistem tenaga listrik, serta mengevaluasi respons sistem untuk mengidentifikasi batas waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*).

5. Kesimpulan

Tahap akhir ini merangkum keseluruhan hasil dari proses pembuatan hingga pengujian *software*. Kesimpulan ditarik berdasarkan kemampuan dan akurasi *software* dalam menyimulasikan dinamika stabilitas transien serta tingkat keberhasilannya dalam menjawab tujuan penelitian

2.4 Diagram Penelitian



Gambar 10. Diagram Alir Penelitian

2.5 Metode Analisis Data

Proses analisis data dalam penelitian ini dimulai dengan mengumpulkan data teknis sistem tenaga listrik, seperti parameter beban, generator, saluran, mesin, serta data yang terkait dengan gangguan seperti hubung singkat tiga fasa. Selanjutnya, model matematis sistem dirancang menggunakan persamaan Newton-Raphson untuk menghitung *Load Flow* ataupun Matriks sebelum terjadi gangguan dan juga persamaan ayunan (*swing equation*) yang kemudian diimplementasikan dalam MATLAB dengan metode Runge-Kutta Orde 4 (RK4) dan Reduksi Kron untuk melihat hasil simulasi pada *software*. Model ini diintegrasikan ke dalam antarmuka grafis (*Graphical User Interface*) melalui fitur ini MATLAB *appdesign* untuk memudahkan pengguna dalam memasukkan parameter dan

melihat hasil analisis secara visual. Tahap validasi dan verifikasi dilakukan dengan membuktikan hasil simulasi dengan referensi dari literatur atau studi kasus yang telah teruji bernilai sama. *Software* kemudian diuji dengan skenario lokasi gangguan, dengan fokus pada analisis respon sudut rotor terhadap waktu, daya listrik terhadap waktu, kecepatan sudut rotor terhadap waktu serta perhitungan waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*). Kinerja *software* dievaluasi berdasarkan kecepatan komputasi, akurasi, dan kemudahan penggunaan.