

Perubahan Daya Beban di Setiap Bus Disimulasikan dengan Aplikasi MATLAB untuk Analogi Fenomena Steady State Stability

Arief Goeritno¹, Tapip Hendrawan²

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Ibn Khaldun Bogor, Kota Bogor, Jawa Barat.

²PT (Persero) Telekomunikasi Indonesia (Telkom), Tbk. Jakarta

Informasi Artikel

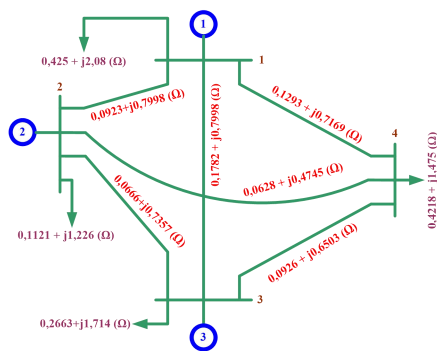
Naskah Diterima : 1 Mei 2019

Direvisi : 14 Mei 2019

Disetujui : 15 Juni 2019

*Korespondensi Penulis :
arief.goeritno@uika-bogor.ac.id

Graphical abstract



Abstract

Changes in load power on each bus is one form of the existence of phenomenon of steady state stability is interpreted as the ability of the system to survive in conditions of synchronization between machines in the system, after a small disturbance. The existence of these phenomena can be done through computer application-based simulations, such as MATLAB. MATLAB based applications for simulation purposes are in the form of program syntax structure for inputting values, assumptions, power flow, and steady state stability data. The syntax structure of the input value data input program contains bus data, generator, and channel impedance between buses. The program syntax structure for simulations of power flow phenomena is used to determine the mechanical power of each engine generating power, due to changes in load. The program syntax structure for the steady state stability phenomenon contains the value of mechanical power from the calculation of the power flow program, each machine's data, and equations for the search for a number of parameters. The engine with the largest power generation takes longer to achieve stability again after changes in load.

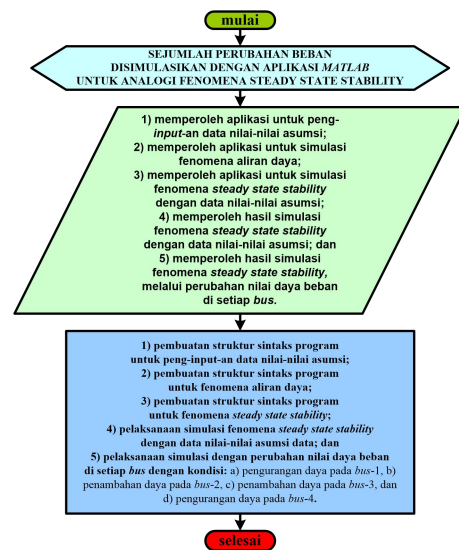
Keywords: load changes on each bus, simulations in electric power systems, MATLAB based applications, the phenomena of steady state stability.

Abstrak

Perubahan daya beban di setiap bus merupakan salah satu bentuk keberadaan fenomena steady state stability dimaknai sebagai kemampuan sistem untuk bertahan dalam kondisi sinkronisasi antar mesin dalam sistem, setelah terjadi gangguan kecil. Keberadaan fenomena tersebut dapat dilakukan melalui simulasi berbasis aplikasi komputer, seperti MATLAB. Aplikasi berbasis MATLAB untuk keperluan simulasi berupa struktur sintaks program untuk peng-input-an data nilai-nilai asumsi, aliran daya, dan steady state stability. Struktur sintaks program peng-input-an data nilai-nilai asumsi berisi bus, generator, dan impedans saluran antar bus. Struktur sintaks program untuk simulasi fenomena aliran daya digunakan untuk penentuan daya mekanis setiap mesin pembangkitan daya, akibat perubahan beban. Struktur sintaks program untuk fenomena steady state stability berisi nilai daya mekanis dari hasil penghitungan program aliran daya, data tiap-tiap mesin, dan persamaan-persamaan untuk pencarian sejumlah parameter. Mesin pembangkit dengan pembangkitan daya terbesar butuh waktu lebih lama untuk pencapaian kondisi kestabilan kembali setelah terdapat perubahan beban.

Kata kunci: perubahan beban di setiap bus, simulasi di sistem daya listrik, aplikasi berbasis MATLAB, fenomena steady state stability.

© 2019 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved



1. PENDAHULUAN

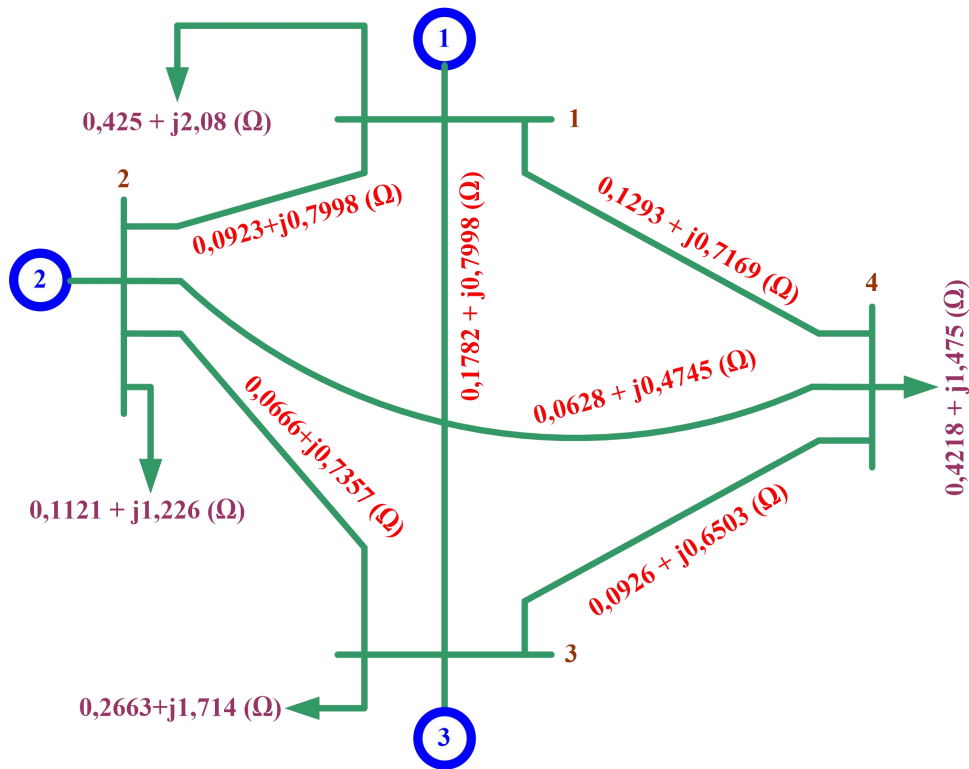
Gangguan pada sistem daya listrik dapat berupa berbagai jenis [1-3], seperti perubahan beban yang tiba-tiba, hubung singkat yang tiba-tiba antara saluran dan tanah [4], gangguan antar saluran, gangguan simetris saluran ke tanah, fenomena peralihan, dan lain-lain. Keberadaan sifat gangguan yang berakibat kepada masalah stabilitas di sistem daya listrik, maka stabilitas dibedakan atas (i)

stabilitas kondisi tetap atau tunak dikenal sebagai *steady state stability*, (ii) stabilitas peralihan (*transient stability*), dan stabilitas subperalihan/dinamis (*subtransient/dynamic stability*) [5,6]. Perubahan beban pada sistem daya listrik (*electrical power system*), baik pengurangan maupun penambahan beban, merupakan fenomena kestabilan keadaan tunak (*steady state stability*) [7]. Stabilitas (kestabilan) dimaknai sebagai kemampuan sistem daya listrik untuk kembali ke kondisi normal atau stabil setelah terganggu [8,9,6]. Stabilitas sistem terutama tergantung pada perilaku mesin sinkron setelah gangguan [10,8], karena batas-batas stabilitas sistem ditandai oleh keberadaan sejumlah daya maksimum teralirkan melalui suatu titik dalam sistem tanpa berakibat kehilangan stabilitas [10,5]. Kehilangan kestabilan pada sistem daya listrik sangat dipengaruhi oleh keberadaan sejumlah gangguan [1], sehingga keberlangsungan sistem daya listrik harus dipertahankan pada kondisi sinkronisasi sesempurna mungkin dalam keadaan tunak (*steady state*) [7,5]. Stabilitas pada sistem daya listrik (*electrical power system, EPS*) telah diakui sebagai problematika untuk pengoperasian sistem daya yang aman sejak dekade 1920-an [7], setelah penggunaan listrik secara komersial pada akhir 1870-an dengan pemasangan lampu-lampu untuk penerangan mercusuar (*lighthouse*) dan penerangan jalan [11].

MATLAB merupakan sistem interaktif dan sebuah aplikasi dengan bahasa pemrograman. Elemen data dasar merupakan sebuah matriks yang tidak perlu pendeklarasian ukuran atau jenis data, sehingga banyak masalah perhitungan dapat diselesaikan pada waktu singkat dan perhitungan diambil untuk dituliskan ke dalam bahasa *FORTRAN* atau C [12,13]. Penyelesaian untuk kasus perhitungan yang kompleks, seperti studi aliran daya, perintah yang telah dimasukkan pada *command windows* sulit untuk dilakukan perubahan terhadap satu nilai atau beberapa variabel atau perintah-perintah guna pengevaluasian kembali. Cara pemecahan kasus yang kompleks dengan mudah dan efisien terhadap problematika pada *command windows MATLAB*, dilakukan melalui pemberian masukan ke dalam sebuah *text file* yang biasa disebut *script files* atau *M-files* [12]. Untuk pembuatan sebuah *script file* dengan pemilihan *New M-file* dari menu *File*, sebuah jendela *text editor* ditampilkan [14].

Steady state stability sangat penting untuk (i) perencanaan dan perancangan sistem daya, (ii) pengembangan perangkat kontrol otomatis khusus, (iii) penempatan elemen baru ke dalam operasi sistem, atau (iv) modifikasi kondisi pengoperasian [15]. Pemilihan stabilitas dibuat berdasarkan persyaratan batas stabilitas atau kualitas daya listrik dalam *steady state* atau selama transien. Batas *steady state* berpedoman kepada aliran daya maksimum melalui titik tertentu tanpa berakibat kehilangan stabilitas, ketika daya dinaikkan atau diturunkan secara bertahap [16,17]. Estimasi batas *steady state* penting untuk analisis sistem daya listrik dengan cakupan pada pengecekan sistem daya listrik dalam kondisi stabil, penentuan batas stabilitas, dan estimasi kualitatif kondisi transien [10,15]. Keberadaan stabilitas dan estimasi batas pada *steady state* diperlukan untuk perkiraan pilihan jenis sistem eksitasi dan pengontrol, mode pengontrolan, parameter sistem kontrol eksitasi, dan otomatisasi, termasuk kinerja pemutus tenaga (PMT) [18]. Hal itu berkaitan dengan keberadaan sistem daya listrik yang terdiri atas beberapa mesin sinkron yang beroperasi dalam sinkronisasi [10,19]. Untuk kondisi dimana gangguan terjadi di sistem, sehingga dalam sistem terjadi pengembangan gaya untuk kembali ke keadaan normal atau stabil [20,8,5].

Berdasarkan kepada kemampuan sistem untuk perolehan kembali sinkronisasi frekuensi di semua jaringan setelah perubahan daya secara bertahap, maka perumusan masalah ditetapkan dengan pelaksanaan simulasi fenomena *steady state stability*. Simulasi tersebut dilakukan melalui pemilihan dan penetapan analogi struktur jaringan daya listrik dengan empat *bus* yang saling terhubung dengan nilai asumsi terhadap sejumlah parameter, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan algoritma dan sintaks berbasis *MATLAB*, dan dilakukan sejumlah simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi awal dan pembuatan kondisi untuk fenomena *steady state stability* melalui perubahan daya pada beban di setiap *bus*. Analogi struktur sistem daya listrik untuk simulasi *steady state stability* [21], seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Analogi struktur sistem daya listrik untuk simulasi *steady state stability*

Berdasarkan Gambar 1 ditunjukkan, bahwa beban dan saluran transmisi penghubung dalam bentuk nilai impedans, yaitu nilai $R + jX$ (ohm). Tanda lingkaran dengan notasi "angka" merupakan simbol generator sinkron pada sistem pembangkitan yang berputar, sedangkan sistem dengan 4 bus, yaitu bus-1, bus-2, bus-3, dan bus-4. Penjabaran lebih lanjut berdasarkan rumusan masalah, maka ditetapkan tujuan penelitian yang berkaitan dengan perolehan struktur sintaks program berbasis MATLAB dan hasil pelaksanaan simulasi. Sasaran penelitian, meliputi (1) perolehan struktur sintaks program peng-*input*-an data nilai-nilai asumsi, (2) struktur sintaks program untuk simulasi fenomena aliran daya, (3) struktur sintaks program untuk simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi, dan (4) pelaksanaan simulasi *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi, dan (5) pelaksanaan simulasi melalui data nilai-nilai asumsi untuk perubahan beban di setiap bus dengan kondisi saat terdapat (a) pengurangan daya pada bus-1, (b) penambahan daya pada bus-2, (c) penambahan daya pada bus-3, dan (d) pengurangan daya pada bus-4.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan Penelitian

Tipe bus untuk simulasi terdiri atas (a) bus ayun (*bus penadah, slack bus, reference bus, swing bus*), (b) bus pembangkitan (*generating bus, voltage control bus*), dan (c) bus beban (*load bus*). Bus ayun ($V - \phi$ bus) dinotasikan terhadap bus-1 yang berfungsi sebagai penanggung kekurangan daya pembangkitan setelah solusi aliran daya diperoleh. Bus pembangkitan ($P - V$) dinotasikan terhadap bus-2 dan bus-3 yang berfungsi sebagai bus dengan parameter injeksi daya aktif dan besar tegangan bus diketahui. Bus beban ($P - Q$ bus) untuk bus-4. Berfungsi sebagai bus dengan parameter injeksi daya aktif dan daya reaktif bus diketahui [22]. Parameter-parameter dalam permodelan matematis diberi nilai-nilai asumsi untuk pensimulasian parameter-parameter *steady state stability* pada analogi sistem daya listrik empat bus tiga pusat pembangkitan dengan perubahan variabel nilai daya beban (*demand*) dan pengaruhnya terhadap masing-masing mesin.

Berpedoman kepada Gambar 1, diketahui nilai-nilai asumsi awal pada permodelan sistem daya listrik empat bus dengan tiga pusat pembangkitan, berupa nilai saluran transmisi dengan basis

pada 100 MVA, sehingga diperoleh satuan *per unit*. Nilai komponen saluran transmisi penghubung, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai komponen saluran transmisi penghubung

Dari bus	Ke bus	R (p.u.)	X (p.u.)
1	2	9,23	79,98
1	3	12,93	71,69
1	4	17,82	79,98
2	3	6,28	47,45
2	4	6,66	73,57
3	4	9,26	65,03

Nilai daya beban (*demand*) pada tiap bus, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Nilai daya beban (*demand*) pada tiap bus

Bus	P_d (MW)	Q_d (MVAr)	$V_{maks.}$ (p.u.)	$V_{min.}$ (p.u.)
1	42,50	203,8	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai keadaan awal masing-masing generator sistem pembangkitan sebelum proses perhitungan aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

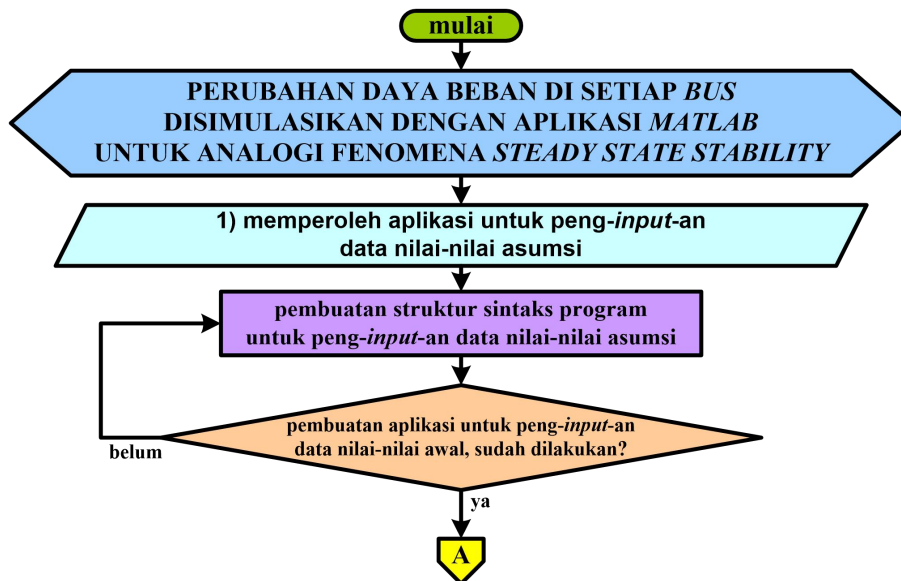
Tabel 3 Nilai keadaan awal masing-masing generator sistem pembangkitan sebelum proses perhitungan aliran daya

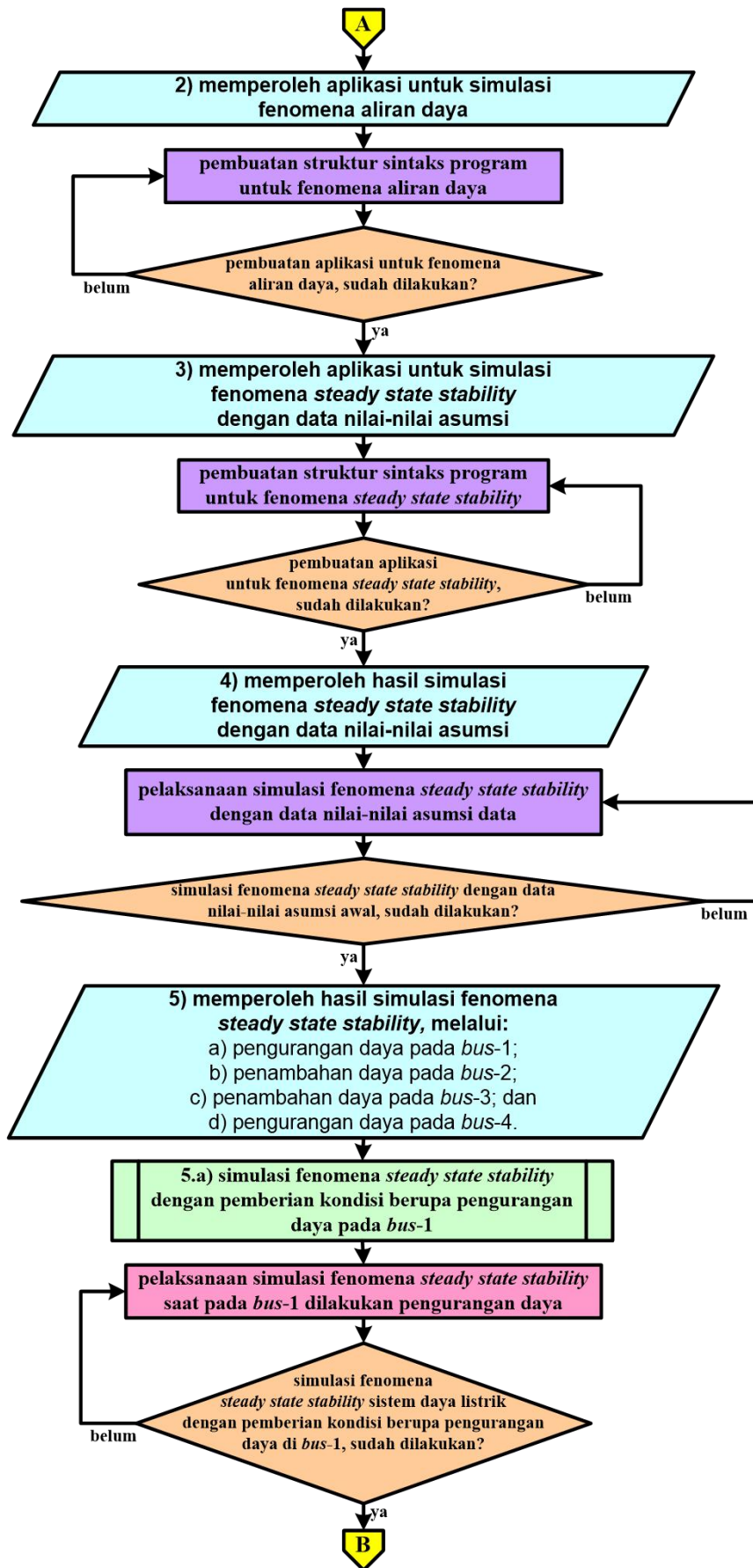
Bus	P_m (MW)	Q_m (MVAr)	V (p.u.)	δ (derajat listrik)	H (MJA/MVA)	f_0 (Hz.)
1	0	0	1,03	0	2,32	60
2	45	0	1,025	0	3,4	60
3	50	0	1,03	0	4,63	60

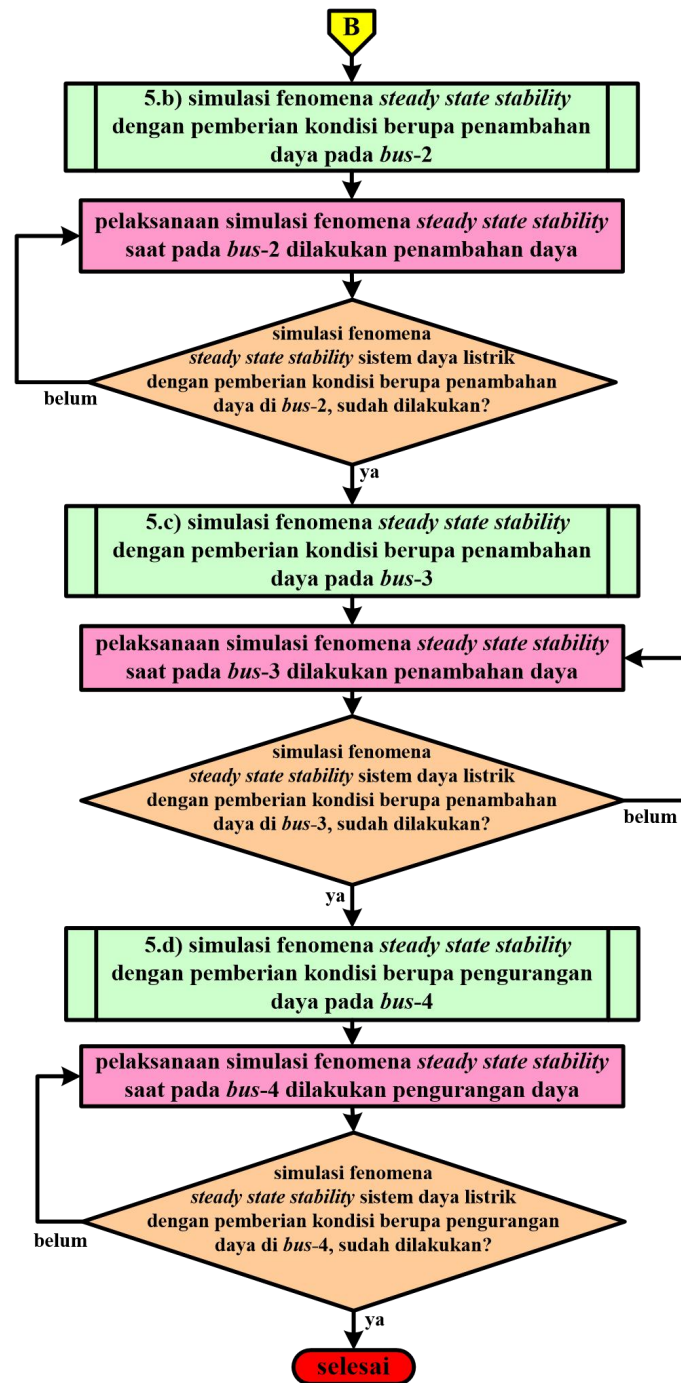
Berdasarkan Tabel 3 telah ditetapkan terhadap bus ke-1 sebagai bus ayun, maka nilai pembangkitan disesuaikan setelah sistem beroperasi.

2.2 Diagram Alir Pelaksanaan Simulasi

Pelaksanaan simulasi terhadap fenomena *steady state stability* pada sistem daya listrik dengan penetapan nilai-nilai asumsi untuk proses simulasi, algoritma dan sintaks pada pembuatan struktur program digunakan aplikasi *MATLAB*, dan pelaksanaan simulasi melalui eksekusi terhadap program. Diagram alir pelaksanaan simulasi terhadap keberadaan fenomena *steady state stability* pada sistem daya listrik yang disimulasikan dengan aplikasi *MATLAB*, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.







Gambar 2 Diagram alir pelaksanaan simulasi terhadap keberadaan fenomena *steady state stability* pada sistem daya listrik yang disimulasikan dengan aplikasi *MATLAB*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Struktur Sintaks Program untuk Peng-input-an Data Nilai-nilai Asumsi

Untuk peng-input-an (pemasukan) data nilai-nilai asumsi diperlukan keberadaan struktur sintaks berbasis aplikasi *MATLAB*. Struktur sintaks program untuk peng-input-an data nilai-nilai asumsi, yaitu:

```

%Listing Program Matlab 5.0
%FOR MULTI-MACHINE SYSTEM
clc
disp(' EKSEKUSI PROGRAM ')
disp('*****')
disp('*PERUBAHAN DAYA BEBAN DI SETIAP BUS*')
disp('*DISIMULASIKAN DENGAN APLIKASI MATLAB*')
    
```



```

disp('*UNTUK ANALOGI FENOMENA STEADY STATE STABILITY*')
disp('*ARIEF GOERITNO, TAPIP HENDRAWAN*')
disp('*PRODI TEKNIK ELEKTRO, UIKA BOGOR*')
disp('*****')
function [baseMVA, bus, gen, branch] = case3gs
% build function for data input of bus system
%----- Data for Power Flow Iteration -----%%
%% system MVA base
baseMVA = 100;
%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
bus = [
    1 3 42.50 203.8 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    2 2 11.21 122.6 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    3 2 26.63 171.4 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
    4 1 42.18 147.5 0 0 1 1 0 230 1 1.1 0.9;
];
%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin
gen = [
    2 45 0 100 -100 1.025 100 1 0 0;
    3 50 0 100 -100 1.03 100 1 0 0;
    1 0 0 100 -100 1.03 100 1 0 0;
];
%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status
branch = [
    1 2 0.0923 0.7998 0.1025 250 250 250 0 0 1;
    1 4 0.1293 0.7169 0.0775 250 250 250 0 0 1;
    1 3 0.1782 0.7998 0.0775 250 250 250 0 0 1;
    2 4 0.0628 0.4745 0.0775 250 250 250 0 0 1;
    2 3 0.0666 0.7357 0.0775 250 250 250 0 0 1;
    3 4 0.0926 0.6503 0.0775 250 250 250 0 0 1;
];
return;

```

Berdasarkan uraian tersebut ditunjukkan, bahwa struktur sintaks program terdiri atas (i) data *bus* yang meliputi nomor *bus*, tipe *bus*, dan data daya beban (*demand*), (ii) data generator yang meliputi daya pembangkit, tegangan, dan data basis, dan (iii) data impedans saluran antar *bus*.

3.2 Struktur Sintaks Program untuk Simulasi Fenomena Aliran Daya

Struktur sintaks program untuk simulasi fenomena aliran daya, yaitu:

```

%Listing Program Matlab 5.0
%FOR MULTI-MACHINE SYSTEM
clc
disp(' EKSEKUSI PROGRAM ')
disp('*****')
disp('*PERUBAHAN DAYA BEBAN DI SETIAP BUS*')
disp('*DISIMULASIKAN DENGAN APLIKASI MATLAB*')
disp('*UNTUK ANALOGI FENOMENA STEADY STATE STABILITY*')
disp('*ARIEF GOERITNO, TAPIP HENDRAWAN*')
disp('*PRODI TEKNIK ELEKTRO, UIKA BOGOR*')
disp('*****')
function [MVAbase, bus, gen, branch, success, et] = ...
    runpf(casename, mpopt, fname, solvedcase)
[PQ, PV, REF, NONE, BUS_I, BUS_TYPE, PD, QD, GS, BS, BUS_AREA, VM, ...
VA, BASE_KV, ZONE, VMAX, VMIN, LAM_P, LAM_Q, MU_VMAX, MU_VMIN] = idx_bus;
[F_BUS, T_BUS, BR_R, BR_X, BR_B, RATE_A, RATE_B, ...
RATE_C, TAP, SHIFT, BR_STATUS, PF, QF, PT, QT, MU_SF, MU_ST] = idx_brch;
[GEN_BUS, PG, QG, QMAX, QMIN, VG, MBASE, ...
GEN_STATUS, PMAX, PMIN, MU_PMAX, MU_PMIN, MU_QMAX, MU_QMIN] = idx_gen;
%% default arguments
if nargin < 4
    solvedcase = ''; %% don't save solved case
    if nargin < 3
        fname = ''; %% don't print results to a file
        if nargin < 2
            mpopt = mpoption; %% use default options
            if nargin < 1
                casename = 'case9'; %% default data file is 'case9.m'
            end
        end
    end
end
end
end
%% options

```

```

verbose = mpopt(31);
qlim = mpopt(6);           %% enforce Q limits on gens?
dc = mpopt(10);           %% use DC formulation?
%% read data & convert to internal bus numbering
[baseMVA, bus, gen, branch] = loadcase(casename);
[i2e, bus, gen, branch] = ext2int(bus, gen, branch);
%% get bus index lists of each type of bus
[ref, pv, pq] = bustypes(bus, gen);
%% generator info
on = find(gen(:, GEN_STATUS) > 0);           %% which generators are on?
gbus = gen(on, GEN_BUS);                     %% what buses are they at?
%%----- run the power flow -----
t0 = clock;

if dc %% DC formulation
    %% initial state
    Va0 = bus(:, VA) * (pi/180);
    %% build B matrices and phase shift injections
    [B, Bf, Pbusinj, Pfinj] = makeBdc(baseMVA, bus, branch);
    %% compute complex bus power injections (generation - load)
    %% adjusted for phase shifters and real shunts
    Pbus = real(makeSbus(baseMVA, bus, gen)) - Pbusinj - bus(:, GS) / baseMVA;
    %% "run" the power flow
    Va = dcpf(B, Pbus, Va0, ref, pv, pq);
    %% update data matrices with solution
    branch(:, [QF, QT]) = zeros(size(branch, 1), 2);
    branch(:, PF) = (Bf * Va + Pfinj) * baseMVA;
    branch(:, PT) = -branch(:, PF);
    bus(:, VM) = ones(size(bus, 1), 1);
    bus(:, VA) = Va * (180/pi);
    %% update Pg for swing generator (note: other gens at ref bus are accounted for in Pbus)
    %% Pg = Pinj + Pload + Gs
    %% newPg = oldPg + newPinj - oldPinj
    refgen = find(gbus == ref);               %% which is(are) the reference gen(s)?
    gen(on(refgen(1)), PG) = gen(on(refgen(1)), PG) + (B(ref, :) * Va - Pbus(ref)) * baseMVA;
    success = 1;
else %% AC formulation
    %% initial state
    % V0 = ones(size(bus, 1), 1);           %% flat start
    V0 = bus(:, VM) .* exp(sqrt(-1) * pi/180 * bus(:, VA));
    V0(gbus) = gen(on, VG) ./ abs(V0(gbus)).* V0(gbus);
    if qlim
        ref0 = ref;                         %% save index and angle of
        Varef0 = bus(ref0, VA);             %% original reference bus
        limited = [];                       %% list of indices of gens @ Q lims
        fixedQg = zeros(size(gen, 1), 1);   %% Qg of gens at Q limits
    end
end

repeat = 1;
while (repeat)
    %% build admittance matrices
    [Ybus, Yf, Yt] = makeYbus(baseMVA, bus, branch);
    %% compute complex bus power injections (generation - load)
    Sbus = makeSbus(baseMVA, bus, gen);
    %% run the power flow
    alg = mpopt(1);
    if alg == 1
        [V, success, iterations] = newtonpf(Ybus, Sbus, V0, ref, pv, pq, mpopt);
    elseif alg == 2 | alg == 3
        [Bp, Bpp] = makeB(baseMVA, bus, branch, alg);
        [V, success, iterations] = fdcpf(Ybus, Sbus, V0, Bp, Bpp, ref, pv, pq, mpopt);
    elseif alg == 4
        [V, success, iterations] = gausspf(Ybus, Sbus, V0, ref, pv, pq, mpopt);
    else
        error('Only Newton''s method, fast-decoupled, and Gauss-Seidel power flow algorithms
currently implemented.');
```



```

    if verbose & ~isempty(mn)
        fprintf('Gen %d at lower Q limit, converting to PQ bus\n', mn);
    end
%% save corresponding limit values
    fixedQg(mx) = gen(mx, QMAX);
    fixedQg(mn) = gen(mn, QMIN);
    mx = [mx;mn];
    %% convert to PQ bus
    gen(mx, QG) = fixedQg(mx);    %% set Qg to binding limit
    gen(mx, GEN_STATUS) = 0;    %% temporarily turn off gen,
    for i = 1:length(mx)        %% (one at a time, since
        bi = gen(mx(i), GEN_BUS);    %% they may be at same bus)
        bus(bi, [PD,QD]) = ...    %% adjust load accordingly,
        bus(bi, [PD,QD]) - gen(mx(i), [PG,QG]);
    end
    bus(gen(mx, GEN_BUS), BUS_TYPE) = PQ; %% & set bus type to PQ
%% update bus index lists of each type of bus
    ref_temp = ref;
    [ref, pv, pq] = bustypes(bus, gen);
    if verbose & ref ~= ref_temp
        fprintf('Bus %d is new slack bus\n', ref);
    end
    limited = [limited; mx];
    else
        repeat = 0; %% no more generator Q limits violated
    end
    else
        repeat = 0; %% don't enforce generator Q limits, once is enough
    end
end
if qlim & ~isempty(limited)
    %% restore injections from limited gens (those at Q limits)
    gen(limited, QG) = fixedQg(limited);    %% restore Qg value,
    for i = 1:length(limited)    %% (one at a time, since
        bi = gen(limited(i), GEN_BUS);    %% they may be at same bus)
        bus(bi, [PD,QD]) = ...    %% re-adjust load,
        bus(bi, [PD,QD]) + gen(limited(i), [PG,QG]);
    end
end
gen(limited, GEN_STATUS) = 1;    %% and turn gen back on
if ref ~= ref0
    %% adjust voltage angles to make original ref bus correct
    bus(:, VA) = bus(:, VA) - bus(ref0, VA) + Varef0;
end
end
end
et = etime(clock, t0);
%%----- output results -----
%% convert back to original bus numbering & print results
[bus, gen, branch] = int2ext(i2e, bus, gen, branch);
if fname
    [fd, msg] = fopen(fname, 'at');
    if fd == -1
        error(msg);
    else
        printpf(baseMVA, bus, gen, branch, [], success, et, fd, mpopt);
        fclose(fd);
    end
end
printpf(baseMVA, bus, gen, branch, [], success, et, 1, mpopt);

%% save solved case
if solvedcase
    savecase(solvedcase, baseMVA, bus, gen, branch);
end
%% this is just to prevent it from printing baseMVA
%% when called with no output arguments
if nargout, MVAbase = baseMVA; end
return;

```

Berdasarkan uraian tersebut ditunjukkan, bahwa struktur sintaks program untuk simulasi fenomena aliran daya digunakan untuk penentuan daya mekanis setiap pembangkit akibat perubahan beban, dengan pengoperasian melalui masukan data pada program peng-input-an data nilai-nilai asumsi awal.

Perolehan data nilai daya mekanis tiap-tiap mesin pembangkit daya listrik, diperlukan penghitungan aliran daya dengan data nilai-nilai asumsi awal tersebut. Nilai daya mekanis awal hasil penghitungan dengan struktur sintaks program untuk fenomena aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Nilai daya mekanis awal hasil perhitungan dengan struktur sintaks program untuk fenomena aliran daya

Bus	Tegangan		Daya dari Generator		Daya ke Beban	
	Mag. (p.u.)	Ang. (deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	35,43	258,06	42,50	203,8
2	1,025	5,464	45,00	176,20	11,21	122,6
3	1,030	3,912	50,00	239,05	26,63	171,4
4	0,514	-0,723	-	-	42,18	147,5
Total:			130,43	673,31	122,52	645,30

Berdasarkan Tabel 4 ditunjukkan, bahwa nilai daya mekanis awal yang di-input-kan ke struktur sintaks program untuk fenomena *steady state stability* sebesar 35,43 MW untuk mesin-1, 45 MW untuk mesin-2, dan 50 MW untuk mesin-3.

3.3 Struktur Sintaks Program untuk Simulasi Fenomena *Steady State Stability*

Struktur sintaks program untuk fenomena *steady state stability*, yaitu:

```
%Listing Program Matlab 5.0
%FOR MULTI-MACHINE SYSTEM
clc
disp(' EKSEKUSI PROGRAM ')
disp('*****')
disp('*PERUBAHAN DAYA BEBAN DI SETIAP BUS*')
disp('*DISIMULASIKAN DENGAN APLIKASI MATLAB*')
disp('*UNTUK ANALOGI FENOMENA STEADY STATE STABILITY*')
disp('*ARIEF GOERITNO, TAPIP HENDRAWAN*')
disp('*PRODI TEKNIK ELEKTRO, UIKA BOGOR*')
disp('*****')
disp('* diketahui data sebagai berikut: *')
disp('* S1=35,43+j258,3; S2=45,00+j176,20; S3=50,00-j239,05 *')
disp('*****')
%disp('*****')
% Data input
% Vbus H X D Fo
V1=1.030; H1=2.32; X1=0.32; D1=0.4; f01=60; % Mesin 1
V2=1.025; H2=3.40; X2=0.33; D2=0.4; f02=60; % Mesin 2
V3=1.030; H3=4.63; X3=0.20; D3=0.4; f03=60; % Mesin 3
% Hasil perhitungan daya mekanis setelah estimasi aliran daya
S1=input ('Masukkan nilai Daya Mekanis Mesin 1 = ')/100;
S2=input ('Masukkan nilai Daya Mekanis Mesin 2 = ')/100;
S3=input ('Masukkan nilai Daya Mekanis Mesin 3 = ')/100;
% nilai real dari daya mekanis
Pm1=abs(S1);
Pm2=abs(S2);
Pm3=abs(S3);
% Perhitungan Arus Listrik yang di hasilkan oleh masing-masing mesin
I1=conj(S1)/conj(V1) % pada mesin 1
I2=conj(S2)/conj(V2) % pada mesin 2
I3=conj(S3)/conj(V3) % pada mesin 3
% Perhitungan tegangan keluaran dari masing-masing mesin
E1=V1+I1*X1 % Perhitungan tegangan pada Mesin 1
E2=V2+I2*X2 % Perhitungan tegangan pada Mesin 2
E3=V3+I3*X3 % Perhitungan tegangan pada Mesin 3
% Perhitungan perubahan putaran, dan frekuensi pada mesin 1
disp(' Hasil Eksekusi')
Pmax1=abs(E1)*V1/X1, d01=asin(Pm1/Pmax1) %Daya maksimum
Psl=Pmax1*cos(d01) %Koefisien Daya Sinkronisasi
wn1=sqrt(pi*60/H1*Psl) %Undamped frequency of oscillation
z1=D1/2*sqrt(pi*60/(H1*Psl)) %Damping ratio
wd1=wn1*sqrt(1-z1^2), fd1=wd1/(2*pi) %Damped frequency oscillation
tau1=1/(z1*wn1) %Waktu tetap
th1=acos(z1) %Sudut fase Tetap
Dd01=10*pi/180 %Initial angle in radian
t1=0:.01:1; % time interval
Dd1=Dd01/sqrt(1-z1^2)*exp(-z1*wn1*t1).*sin(wd1*t1+th1); % perubahan sudut rotor
d1=(d01+Dd1)*180/pi ; %Power angle in degree
```

```

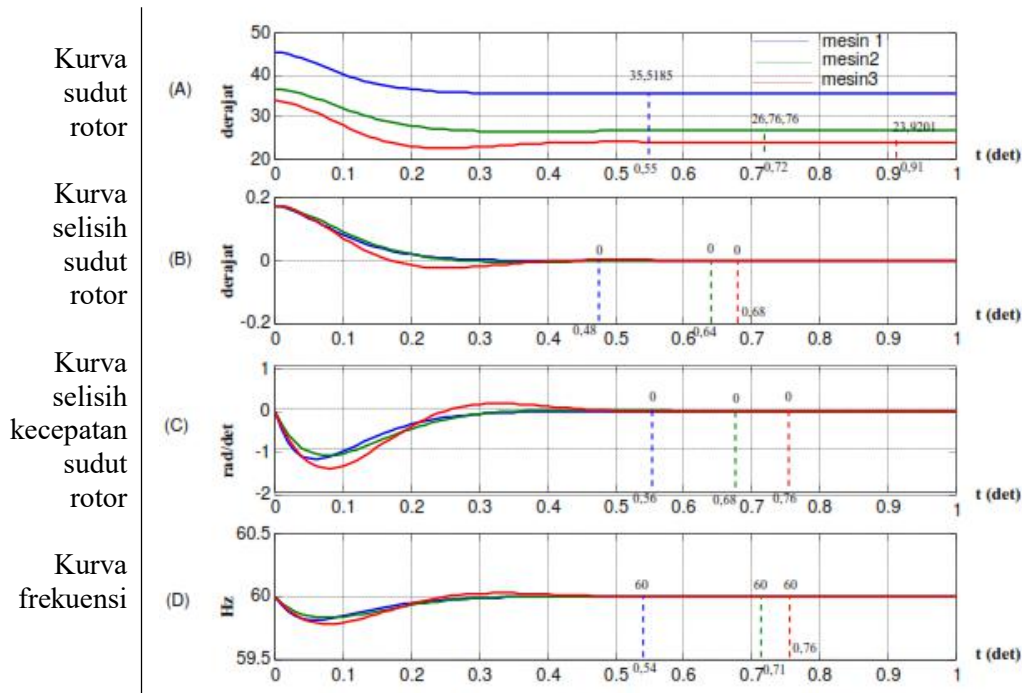
Dw1=-wn1*Dd01/sqrt(1-z1^2)*exp(-z1*wn1*t1).*sin(wd1*t1); % perubahan kecepatan putar sudut
rotor
f1=f01+Dw1/(2*pi); %Frekuensi (Hz)
% Perhitungan perubahan putaran, dan frekuensi pada mesin 2
Pmax2=abs(E2)*V2/X2, d02=asin(Pm2/Pmax2) %Daya maksimum
Ps2=Pmax2*cos(d02) %Koefisien Daya Sinkron
wn2=sqrt(pi*60/H2*Ps2) %Undamped frequency of oscillation
z2=D2/2*sqrt(pi*60/(H2*Ps2)) %Damping ratio
wd2=wn2*sqrt(1-z2^2),fd2=wd2/(2*pi) %Damped frequency oscill
tau2=1/(z2*wn2) %Waktu tetap
th2=acos(z2) %Sudut fase Teta
Dd02=10*pi/180 %Initial angle in radian
Dd2=Dd02/sqrt(1-z2^2)*exp(-z2*wn2*t1).*sin(wd2*t1+th2);% perubahan sudut rotor
d2=(d02+Dd2)*180/pi ; %Power angle in degree
Dw2=-wn2*Dd02/sqrt(1-z2^2)*exp(-z2*wn2*t1).*sin(wd2*t1);%perubahan kecepatan putar sudut rotor
f2=f02+Dw2/(2*pi) ; %Frekuensi (Hz)
% Perhitungan perubahan putaran, dan frekuensi pada mesin 3
Pmax3=abs(E3)*V3/X3, d03=asin(Pm3/Pmax3) %Daya maksimum
Ps3=Pmax3*cos(d03) %Koefisien Daya Sinkron
wn3=sqrt(pi*60/H3*Ps3) %Undamped frequency of oscillation
z3=D3/2*sqrt(pi*60/(H3*Ps3)) %Damping ratio
wd3=wn3*sqrt(1-z3^2),fd3=wd3/(2*pi) %Damped frequency oscill
tau3=1/(z3*wn3) %Waktu tetap
th3=acos(z3) %Sudut fase Teta
Dd03=10*pi/180 %Initial angle in radian
Dd3=Dd03/sqrt(1-z3^2)*exp(-z3*wn3*t1).*sin(wd3*t1+th3);
d3=(d03+Dd3)*180/pi ; %Power angle in degree
Dw3=-wn3*Dd03/sqrt(1-z3^2)*exp(-z3*wn3*t1).*sin(wd3*t1);
f3=f03+Dw3/(2*pi) ; %Frekuensi (Hz)
% pencetakan grafik perubahan sudut, perubahan kecepatan sudut dan perubahan frekuensi
subplot(4,1,2), plot(t1,Dd1,t1,Dd2,t1,Dd3), grid % Grafik Perubahan sudut rotor mesin 1
xlabel('t (sec)'), ylabel('Delta Rotor Angle in (degree)')
subplot(4,1,4), plot(t1,f1,t1,f2,t1,f3), grid % Grafik perubahan sudut rotor mesin 2
xlabel('t (sec)'), ylabel('Frekuensi in (Hz)')
subplot(4,1,3), plot(t1,Dw1,t1,Dw2,t1,Dw3), grid % Grafik perubahan sudut rotor mesin 3
xlabel('t (sec)'), ylabel('Delta Omega in (rad/sec)')
subplot(4,1,1), plot(t1,d1,t1,d2,t1,d3), grid % Grafik perubahan sudut rotor mesin 3
xlabel('t (sec)'), ylabel('Rotor Angle in (degree)')
subplot(111)
disp('*****Grafik 1*****')
disp('')
disp('***** END *****')

```

Berdasarkan uraian tersebut ditunjukkan, bahwa struktur sintaks program untuk fenomena *steady state stability* terdiri atas (i) nilai daya mekanis sebagai data masukan yang diperoleh dari hasil penghitungan program aliran daya; (ii) data tiap mesin berupa nilai tegangan, momen inersia, rasio *damping*, frekuensi, dan resistans dalam mesin; dan (iii) persamaan-persamaan untuk pencarian nilai arus, tegangan, fekuensi, sudut rotor, delta sudut rotor, delta kecepatan sudut, dan daya maksimum untuk tiap-tiap mesin yang berpengaruh terhadap ketidakstabilan.

3.4 Hasil Simulasi Fenomena *Steady State Stability* dengan Data Nilai-nilai Asumsi Awal

Hasil simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi awal, seperti ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3 Hasil simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi awal

Berdasarkan Gambar 3 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter. Nilai-nilai sejumlah parameter hasil simulasi dengan data nilai-nilai asumsi, seperti ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Nilai-nilai sejumlah parameter hasil simulasi dengan data nilai-nilai asumsi

Parameter	Mesin ke-		
	1	2	3
(A) Sudut Rotor			
Nilai awal tidak stabil (derajat)	45,5198	36,7641	33,9222
Nilai stabil (derajat)	35,5185	26,7676	23,9201
Pencapaian waktu stabil (detik)	0,55	0,72	0,91
(B) Selisih sudut rotor			
Nilai awal tidak stabil (derajat)	0,1745	0,1745	0,1745
Nilai stabil (derajat)	0,0000	0,0000	0,0000
Pencapaian waktu stabil (detik)	0,48	0,64	0,68
(C) Selisih kecepatan sudut rotor			
Nilai awal tidak stabil (rad./det.)	-0,4400	-0,3119	-0,359
Nilai stabil (rad./det.)	0,0000	0,0000	0,0000
Pencapaian waktu stabil (detik)	0,56	0,68	0,76
(D) Frekuensi			
Nilai awal tidak stabil (Hz.)	59,9300	59,9504	59,9428
Nilai stabil (Hz.)	60,0000	60,0000	60,0000
Pencapaian waktu stabil (detik)	0,54	0,71	0,76

Berdasarkan Tabel 5 ditunjukkan, bahwa terdapat kemunculan sejumlah fenomena, yaitu (a) perubahan nilai sudut rotor saat pencapaian stabil, (b) pencapaian waktu saat delta rotor mencapai 0 derajat (stabil), (c) pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil), dan (d) pencapaian waktu saat nilai frekuensi mencapai 60 Hz. (stabil). Mesin pembangkit dengan pembangkitan daya terbesar (dalam hal ini mesin-3) butuh waktu lebih lama untuk pencapaian kondisi kestabilan kembali setelah terdapat perubahan beban.

3.5 Hasil Simulasi Fenomena *Steady State Stability* melalui Data Nilai-nilai Asumsi untuk Perubahan Beban di Setiap Bus

Dalam simulasi fenomena *steady state stability* ini dibuat dengan kondisi (a) pengurangan daya di bus-1, (b) penambahan daya di bus-2, (c) penambahan daya di bus-3, dan (d) pengurangan daya di bus-4.

(3.5) a) Fenomena *steady state stability* dengan data perubahan nilai daya beban di bus-1

Perubahan nilai beban berupa pengurangan daya aktif dan reaktif dari $P = 42,50$ MW dan $Q = 203,8$ MVar menjadi $P = 25,00$ MW dan $Q = 125,5$ MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-1, seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6 Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-1

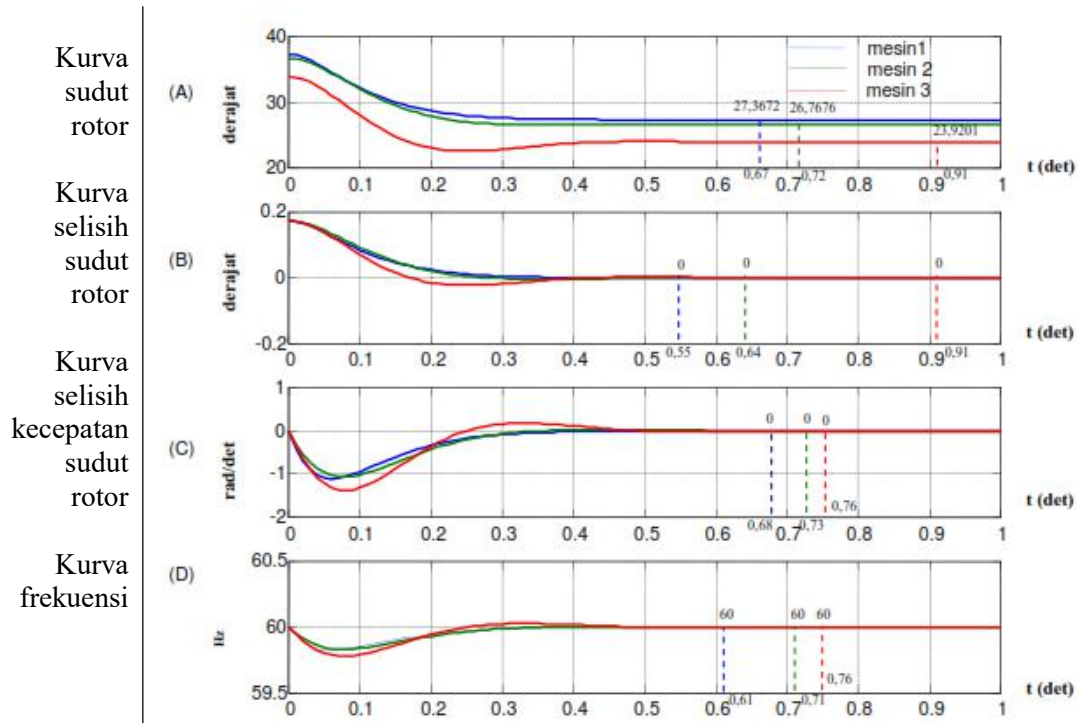
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 6 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan nilai daya di bus-1. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7 Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	Mag.(p.u.)	Ang.(deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	17,93	179,76	25,50	125,5
2	1,025	5,464	45,00	176,20	11,21	122,6
3	1,030	3,912	50,00	239,05	26,63	171,4
4	0,514	-0,723	-	-	42,18	147,5
Total:			112,93	595,01	105,02	567,00

Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-1, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-1

Berdasarkan Gambar 4 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Pengurangan nilai daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus-1 (dari $P = 42,50$ MW dan $Q = 203,8$ MVar menjadi $P = 25,00$ MW dan $Q = 125,5$ MVar), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat pengurangan daya di bus-1, seperti ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Sejumlah fenomena akibat pengurangan nilai daya di bus-1

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	27,3672	8,1526	lebih kecil
	2	26,7676	26,7676	0	Tetap
	3	23,9201	23,9201	0	Tetap
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,55	0,07	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,91	0,23	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,68	0,12	lebih lambat
	2	0,68	0,73	0,05	lebih lambat
	3	0,76	0,76	0	tetap
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,61	0,07	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	lebih lambat
	3	0,76	0,76	0	tetap

(3.5) b) Fenomena steady state stability dengan data perubahan nilai daya beban di bus-2

Perubahan nilai beban berupa penambahan daya aktif dan reaktif dari $P = 11,21$ MW dan $Q = 122,6$ MVar menjadi $P = 40,00$ MW dan $Q = 200$ MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-2, seperti ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9 Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-2

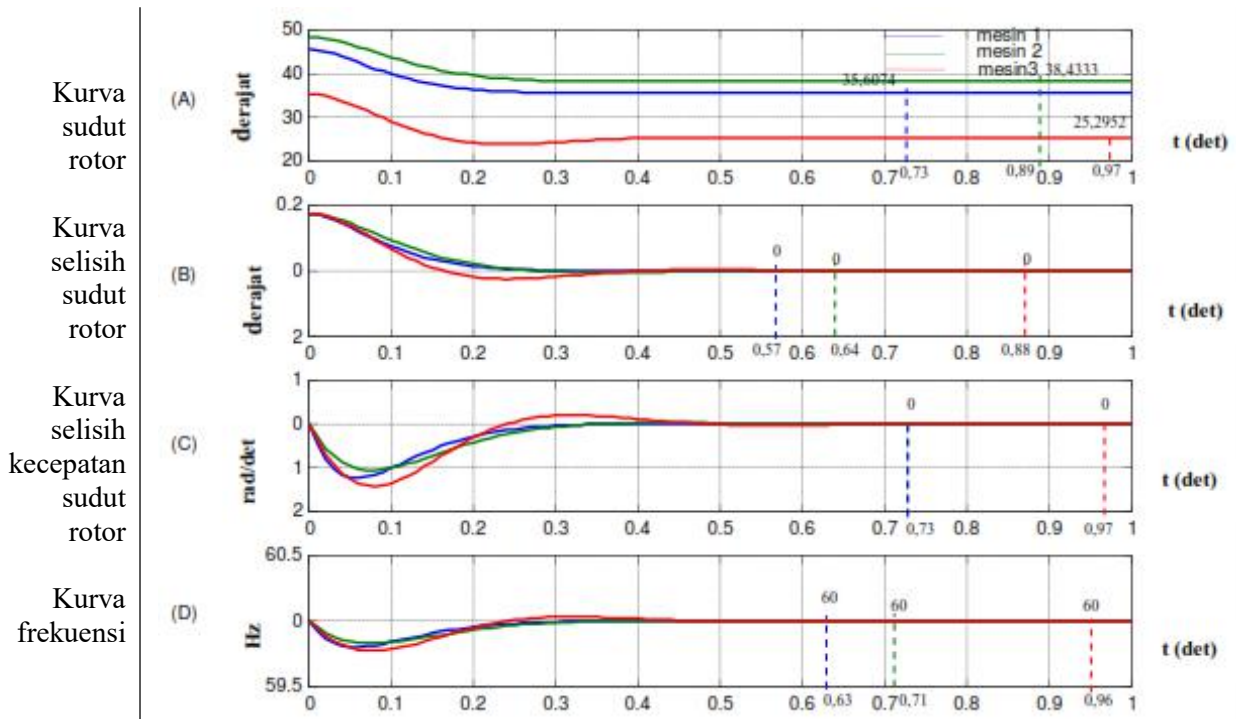
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	40,00	200,00	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 9 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan daya di bus-2. Nilai daya mekanis hasil perhitungan dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10 Nilai daya mekanis hasil perhitungan dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	Mag. (p.u.)	Ang. (deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	73,60	275,64	42,50	203,8
2	1,025	-2,137	45,00	282,56	40,00	200,00
3	1,030	-1,120	50,00	269,23	26,63	171,4
4	0,325	-0,723	-	-	42,18	147,5
Total:			168,60	827,43	151,31	722,70

Penggunaan Tabel 10 diperoleh kurva hasil simulasi. Hasil simulasi steady state stability dengan perubahan daya di bus-2, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-2

Berdasarkan Gambar 5 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Penambahan nilai daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus-2 (dari P = 11,21 MW dan Q = 122,6 MVar menjadi P = 40,00 MW dan Q = 200 MVar), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-2, seperti ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 11 Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-2

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	35,6074	0,0876	lebih besar
	2	26,7676	38,4333	11,6657	lebih besar
	3	23,9201	25,2952	1,3751	lebih besar
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,57	0,09	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,88	0,20	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,73	0,17	lebih lambat
	2	0,68	0,73	0,05	lebih lambat
	3	0,76	0,97	0,21	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,63	0,09	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	tetap
	3	0,76	0,96	0,20	lebih lambat

(3.5) c) Fenomena *steady state stability* dengan data perubahan nilai daya beban di bus-3

Perubahan nilai beban berupa penambahan daya aktif dan reaktif dari P = 26,63 MW dan Q = 171,4 MVar menjadi P = 35,75 MW dan Q = 195,5 MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-3, seperti ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12 Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan penambahan daya di bus-3

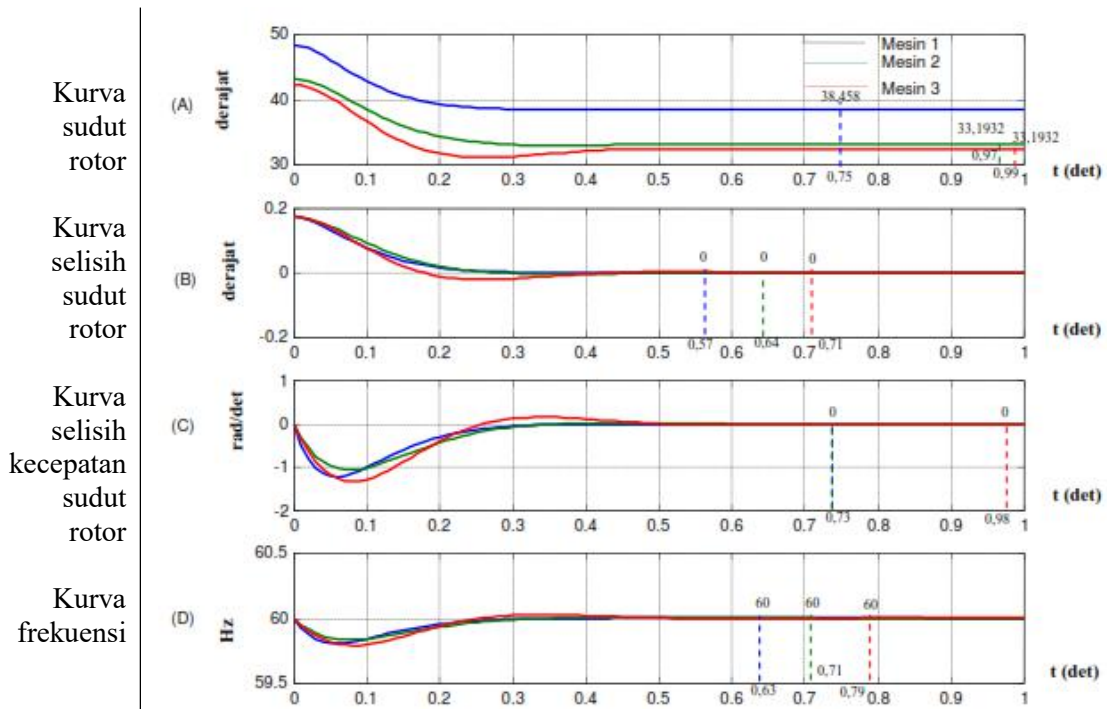
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVA _r)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	35,75	195,5	1,1	0,9
4	42,18	147,5	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 12 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan daya di bus-3. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 13.

Tabel 13 Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	Mag.(p.u.)	Ang.(deg.)	P (MW)	Q (MVA _r)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	1,030	0,00	64,40	303,52	42,50	203,8
2	1,025	5,464	45,00	231,56	11,21	122,6
3	1,030	3,912	50,00	328,09	35,75	195,5
4	0,114	-0,723	-	-	42,18	147,5
Total:			159,40	863,17	131,64	669,40

Penggunaan Tabel 13, diperoleh kurva hasil simulasi. Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-3, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-3

Berdasarkan Gambar 6 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Penambahan daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus 3 (dari P = 26,63 MW dan Q = 171,4 MVA_r menjadi P = 35,75 MW dan Q = 195,5 MVA_r), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-3, seperti ditunjukkan pada Tabel 14.

Tabel 14 Sejumlah fenomena akibat penambahan daya di bus-3

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	38,4580	2,9382	lebih besar
	2	26,7676	33,1932	6,4256	lebih besar
	3	23,9201	32,3113	8,3912	lebih besar
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,57	0,09	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,71	0,03	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,73	0,17	lebih lambat
	2	0,68	0,73	0,05	lebih lambat
	3	0,76	0,98	0,22	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,63	0,09	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	tetap
	3	0,76	0,79	0,03	lebih lambat

(3.5) d) Fenomena steady state stability dengan data perubahan nilai daya beban di bus-4

Perubahan nilai beban berupa pengurangan daya aktif dan reaktif dari $P = 42,18$ MW dan $Q = 147,5$ MVar menjadi $P = 10,15$ MW dan $Q = 60,75$ MVar. Nilai daya beban setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-4, seperti ditunjukkan pada Tabel 15.

Tabel 15 Nilai daya setiap bus setelah dilakukan pengurangan daya di bus-4

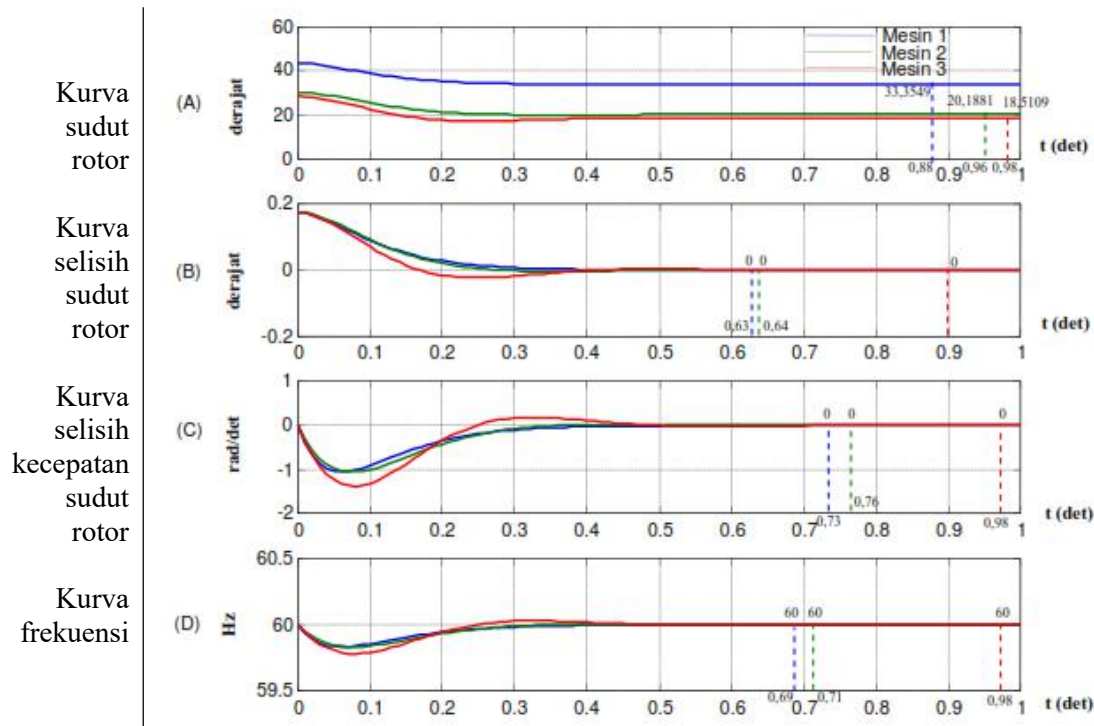
Bus	P_d (MW)	Q_d (MVar)	V_{maks} (p.u.)	V_{min} (p.u.)
1	25,00	125,5	1,1	0,9
2	11,21	122,6	1,1	0,9
3	26,63	171,4	1,1	0,9
4	10,15	60,75	1,1	0,9

Nilai-nilai pada Tabel 15 digunakan untuk perolehan daya mekanis setelah perubahan daya di bus-4. Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya, seperti ditunjukkan pada Tabel 16.

Tabel 16 Nilai daya mekanis hasil simulasi dengan program aliran daya

Bus	Tegangan		Generator		Beban	
	Mag.(p.u.)	Ang.(deg.)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1,030	0,00	-2,18	219,65	42,50	203,8
2	1,025	8,836	45,00	124,71	11,21	122,6
3	1,030	7,622	50,00	180,21	26,63	171,4
4	0,887	5,360	-	-	10,15	60,75
Total:			92,82	524,57	90,49	558,55

Penggunaan Tabel 16 diperoleh kurva hasil simulasi. Hasil simulasi steady state stability dengan perubahan daya di bus-4, seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Hasil simulasi *steady state stability* dengan perubahan daya di bus-4

Berdasarkan Gambar 7 ditunjukkan, bahwa waktu pencapaian kondisi stabil diawali oleh mesin-1, kemudian mesin-2, dan terakhir mesin-3 untuk semua parameter.

Pengurangan nilai daya aktif dan reaktif pada beban yang terhubung di bus-4 (dari $P = 42,18$ MW dan $Q = 147,5$ MVar, menjadi $P = 10,15$ MW dan $Q = 60,75$ MVar), berakibat kepada kemunculan sejumlah fenomena. Sejumlah fenomena akibat pengurangan daya di bus-4, seperti ditunjukkan pada Tabel 17.

Tabel 17 Sejumlah fenomena akibat pengurangan daya di bus-4

Fenomena	Mesin Ke	Nilai Awal (derajat)	Nilai Akhir (derajat)	Selisih (derajat)	Keterangan
Perubahan nilai sudut rotor saat tercapai kondisi stabil	1	35,5198	33,3549	2,1649	lebih kecil
	2	26,7676	20,1882	6,5794	lebih kecil
	3	23,9201	18,5109	5,4092	lebih kecil
Pencapaian waktu saat delta rotor tercapai stabil (pada nilai 0 derajat)	1	0,48	0,63	0,15	lebih lambat
	2	0,64	0,64	0	tetap
	3	0,68	0,90	0,22	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil)	1	0,56	0,73	0,17	lebih lambat
	2	0,68	0,76	0,08	lebih lambat
	3	0,76	0,98	0,22	lebih lambat
Pencapaian waktu saat nilai frekuensi tercapai 60 Hz. (stabil)	1	0,54	0,69	0,15	lebih lambat
	2	0,71	0,71	0	tetap
	3	0,76	0,98	0,22	lebih lambat

(3.5) e) Ringkasan hasil simulasi fenomena *steady state stability* dengan data perubahan nilai daya beban di setiap bus

Berpedoman kepada sejumlah Tabel yang meliputi Tabel 8, Tabel 11, Tabel 14, dan Tabel 17 ditunjukkan, bahwa terdapat kemunculan sejumlah fenomena, yaitu (a) perubahan nilai sudut rotor saat pencapaian stabil, (b) pencapaian waktu saat delta rotor mencapai 0 derajat (stabil), (c) pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil), dan (d) pencapaian waktu saat nilai frekuensi mencapai 60 Hz. (stabil). Mesin pembangkit dengan pembangkitan daya terbesar (dalam hal ini mesin-3) butuh waktu lebih lama untuk pencapaian kondisi kestabilan kembali setelah terdapat perubahan beban.

4. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan sejumlah uraian pada pembahasan, maka ditarik kesimpulan sesuai tujuan penelitian.

- (1) Struktur sintaks program terdiri atas (i) data *bus* yang meliputi nomor *bus*, tipe *bus*, dan data daya beban (*demand*), (ii) data generator yang meliputi daya pembangkitan, nilai tegangan, dan data basis, dan (iii) data impedans saluran antar *bus*.
- (2) Struktur sintaks program untuk simulasi fenomena aliran daya digunakan untuk penentuan daya mekanis setiap mesin pembangkitan daya akibat perubahan beban, dengan pengoperasian melalui masukan data pada program peng-*input*-an data nilai-nilai asumsi awal. Nilai daya mekanis awal yang di-*input*-kan ke struktur sintaks program untuk fenomena *steady state stability* sebesar 35,43 untuk mesin-1, 45 untuk mesin-2, dan 50 untuk mesin-3.
- (3) Struktur sintaks program untuk fenomena *steady state stability* terdiri atas (i) nilai daya mekanis sebagai data masukan yang diperoleh dari hasil penghitungan program aliran daya; (ii) data tiap mesin berupa nilai tegangan, momen inersia, rasio *damping*, frekuensi, dan resistans dalam mesin; dan (iii) persamaan-persamaan untuk pencarian nilai arus, tegangan, frekuensi, sudut rotor, delta sudut rotor, delta kecepatan sudut, dan daya maksimum untuk tiap-tiap mesin yang berpengaruh terhadap ketidakstabilan.
- (4) Hasil simulasi fenomena *steady state stability* dengan data nilai-nilai asumsi awal berupa kemunculan sejumlah fenomena, yaitu (a) perubahan nilai sudut rotor saat pencapaian stabil, (b) pencapaian waktu saat delta rotor mencapai 0 derajat (stabil), (c) pencapaian waktu saat nilai delta omega mencapai 0 rad/det (stabil), dan (d) pencapaian waktu saat nilai frekuensi mencapai 60 Hz. (stabil). Mesin pembangkit dengan pembangkitan daya terbesar (dalam hal ini mesin-3) butuh waktu lebih lama untuk pencapaian kondisi kestabilan kembali setelah terdapat perubahan beban.
- (5) Fenomena-fenomena pada pemberian simulasi perubahan daya pada beban terpasang di setiap *bus* sesuai tujuan penelitian, yaitu (a) Daya aktif pada mesin-2 dan mesin-3 selalu tetap, tetapi daya reaktif berubah untuk pengaturan tegangan, agar tegangan generator sama dengan tegangan sistem; (b) Nilai sudut rotor berbanding lurus dengan perubahan daya beban, jika beban daya naik maka nilai sudut naik begitupun sebaliknya, sehingga kondisi tersebut berpengaruh kepada perubahan daya mekanis, yaitu saat keadaan stabil daya mekanis sesuai kondisi daya beban, dimana daya mekanis tersebut berpengaruh terhadap nilai sudut rotor; (c) Pencapaian waktu stabil selisih sudut rotor (delta rotor) dan waktu stabil frekuensi mesin-2 tidak dipengaruhi oleh perubahan daya beban; (d) Perubahan daya beban berakibat pencapaian waktu stabil selisih kecepatan sudut rotor (delta omega) relatif lebih lambat; (e) Generator dengan kapasitas besar perlu waktu pencapaian stabil lebih lambat, dalam hal ini kapasitas mesin-1 lebih kecil dari mesin-2 dan lebih kecil dari mesin-3. Rasio peredaman (*damping ratio*) berbanding terbalik dengan nilai daya beban, jika daya beban naik maka rasio peredaman berkurang; dan (f) Sistem kembali stabil pada saat mesin yang terakhir capai waktu stabil, yaitu dalam hal kesamaan frekuensi, urutan fase, dan sudut fase. Dalam simulasi ini, setelah mesin-3 capai waktu stabil.

4.2 Rekomendasi

Dalam pelaksanaan simulasi untuk analogi fenomena *steady state stability*, masih perlu pengembangan dengan analogi struktur sistem daya listrik yang lebih besar dan kompleks, juga melalui pemberian kondisi perubahan secara simultan di setiap *bus*.

REFERENSI

- [1] B. Ravindranath, & M. Chander, 1977. *Power System Protection and Switchgear*, New Delhi: Wiley Eastern Limited, pp. 1-14.
- [2] U.A. Bakshi, & M.V. Bakshi, 2009. *Protection and Switchgear*. Pune: Technical Publication, pp. 1-34.

- [3] B. Ram, & D.N. Vishwakarma, 2011. *Power System Protection and Switchgear*, Second Edition. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education Private Limited, pp. 1-31.
- [4] A. Goeritno, & Saidah. "Simulation of Single-phase to Ground Fault to Anticipate Against the Sympathetic Tripping Phenomena," in *Proceeding of the 1st ICETIA*, UMS, Surakarta, 2014, pp. 229-233. [Online]. Available: <https://publikasiilmiah.ums.ac.id/xmlui/bitstream/handle/11617/4994/37-Arief%20Goeritno.pdf?sequence=1>
- [5] D. Das, 2006. *Electrical Power Systems*. New Delhi: New Age International Limited, pp. 276-306.
- [6] P.S.R. Murthy, 2007. *Power System Analysis*. Hyderabad: BS Publication, pp. 259-289.
- [7] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. van Cutsem, and V. Vittal. "Definition and Classification of Power System Stability," in *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), May 2004, pp. 1387-1401.
- [8] H. Saadat, 1999. *Power System Analysis*. New York, NY: McGraw-Hill, Inc., pp. 460-526.
- [9] P.M. Anderson, & A.A. Fouad, 2003. *Power System Control and Stability*. Hoboken: Wiley-IEEE Press, pp. 3-12.
- [10] S.L. Uppal, 1984. *Electrical Power: Generation, Transmission, Distribution, Witchgear and Protection, Utilization of Electrical Energy and Electric Traction*,. Delhi: Khanna Publisher, pp. 654-699.
- [11] P. Kundur, 1994. *Power System Stability and Control*. New York, NY: McGraw-Hill, Inc., pp. 3-16.
- [12] J. Kiusalaas, 2005. "Introduction to MATLAB," in *Numerical Methods in Engineering with MATLAB*. New York, NY: Cambridge University Press, pp. 1-27.
- [13] H. Moore, 2012. "About MATLAB," in *MATLAB for Engineers*, Third Edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc., pp. 1-8.
- [14] D. McMahan, 2007. "The MATLAB Environment," in *MATLAB Demystified*. New York, NY: McGraw-Hill Companies, pp. 1-14.
- [15] M.P. Bahrman, & B.K. Johnson. "Transmission Lines: Steady State Operation," in *Power System Analysis and Design*, 5th ed. J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, and Thomas J. Overbye (editors). Stamford, CT: Cengage Learning, 2012, pp. 233-293..
- [16] IEEE Committee Report, "Proposed Terms and Definitions for Power System Stability," in *IEEE Transaction on Power Apparatus and System*, 101(7), 1982, pp. 1894-1898.
- [17] S.C. Savulescu, "Fast Computation of the Steady-State Stability Limit," in *Real-Time Stability in Power Systems: Techniques for Early Detection of the Risk of Blackout*, 2nd ed. S.C. Savulescu (Editor). Cham: Springer International Publishing, 2014, pp. 27-61.
- [18] A. Goeritno, & S. Rasiman. "Performance of Bulk Oil Circuit Breaker (BOCB) Influenced by Its Parameters (Case Study at the Substation of Bogor Baru)," in *the 3rd International Conference on Engineering, Technology and Industrial Application* (the 3rd ICETIA, 2016), 2017, pp. (020001) 1-12. [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4985446>.
- [19] K. Yong-Hak, K. Tae-Kyun, K. No-Hong, C. Jin-Boo, J. Joon-Young, & S. Seok-Ha. "Determination of Synchronous Machine and Excitation Systems Parameters From Field Tests," in *IFAC Power Plants and Power Systems Control*, 2003, pp. 757-760.
- [20] J.J. Grainger, & W.D. Stevenson, 1994. *Power System Analysis*. New York, NY: McGraw-Hill, Inc., pp. 695-747.
- [21] W.K. Ang. *Energy Function for Power Stability Assessment*, Thesis, the University of Queensland, Brisbane, 2003.
- [22] A. Goeritno, & Z. Hardiyanto, (2008, April). *Simulasi Fenomena Aliran Daya pada Sistem Tenaga Listrik "IEEE 5-Bus" Berbasis Metode Numeris dan Berbantuan Aplikasi MATLAB*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/321427006_SIMULASI_FENOMENA_ALIRAN_DAYA_PADA_SISTEM_TENAGA_LISTRIK_IEEE_5-BUS_BERBASIS_METODE_NUMERIS_DAN_BERBANTUAN_APLIKASI_MATLAB.