

Implementasi Pemodelan Arus dan Putaran Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metoda Runge-Kutta Orde Empat Berbasis Raspberry PI

Nanang Mulyono¹, Dwi Septiyanto²

^{1,2}Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung

¹E-mail: nanang.mulyono@polban.ac.id

²E-mail: dwi.septiyanto@Polban.ac.id

ABSTRAK

Karya ilmiah ini mendiskusikan hasil pemodelan dinamik motor pada keadaan berbeban dan tidak berbeban. Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan simulator motor induksi 3 fasa dengan karakteristik arus stator dan kecepatan rotor yang sama dengan hasil simulasi karakteristik motor induksi berbasis MATLAB. Simulasi model dinamik motor induksi 3 fasa dibangun berbasis modul raspberry pi dengan menggunakan metoda runge-kutta orde empat dan perangkat lunak Python. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik untuk parameter arus stator dan kecepatan rotor. Perbandingan hasil simulasi model yang didapat terhadap hasil simulasi menggunakan MATLAB menunjukkan nilai perbedaan yang lebih kecil dari 11% dan 14%, secara berurutan untuk besaran arus stator dan putaran rotor. Sedangkan bentuk atau kontur grafik hasil simulasi yang diperoleh pada model yang dibuat tersebut relatif sama dengan hasil simulasi MATLAB.

Kata Kunci

Runge-kutta orde empat, model dinamik, motor induksi, raspberry pi

1. PENDAHULUAN

Motor induksi banyak digunakan pada industri karena memiliki efisiensi yang tinggi, handal, robust, murah dan mampu *self starting* yang baik [8,9]. SNI-225 mensyaratkan dalam hal pemilihan motor listrik, metoda pengasutan dan pembatasan arus asut. Metoda pengasutan yang digunakan relatif terhadap torsi beban, karakteristik pengasutan yang diinginkan (arus pengasutan, akselerasi) dan karakteristik dari catu daya. Dalam hal tersebut Instansi yang berwenang dapat menetapkan peraturan yang mengharuskan dilakukannya pembatasan arus asut sampai nilai tertentu bagi motor dengan daya pengenal tertentu [5]. Motor listrik dalam skala industri menarik arus asut yang sangat besar. Besarnya arus asut tersebut sekitar sepuluh kali dari arus [7]. Arus asut yang besar dapat menyebabkan flicker. *Flicker* merupakan salah satu parameter kualitas daya. Kualitas daya yang buruk dapat menyebabkan malfungsi dari perlengkapan listrik. Kondisi transien dan subtransien dari arus listrik berperan penting dalam pemilihan perlengkapan listrik.

Temperatur motor pada kondisi beban penuh merupakan salah satu parameter penting dari motor induksi. Secara konvensional, untuk mencapai kondisi beban penuh dilakukan dengan membebani poros motor (terkopel secara mekanik) dengan mesin lainnya. Pembebanan motor dengan cara

tersebut membutuhkan biaya yang tidak sedikit, terutama untuk mesin besar atau untuk mesin kecepatan tinggi[6]. Simulasi dinamik memainkan peranan penting pada pre-testing sistem penggerak seperti motor listrik. Pre-testing diperlukan baik dalam dunia industri maupun akademik. Pre-testing menggunakan simulasi dinamik dapat membantu dalam persiapan eksperimental yang akan digunakan untuk uji-eksperimental[1],[2]. Oleh karena itu peralatan penunjang yang relatif murah untuk pengujian-pengujian motor induksi sangat diperlukan, diantaranya simulator motor induksi 3 fasa.

Bélangier[11] dan Surapu Jagan[12], dalam penelitiannya menjelaskan tentang konfigurasi dari real-time digital simulators yaitu konfigurasi *Rapid Control Prototyping (RCP)*, *Hardware-in-the-Loop (HIL)* dan *Software in the loop (SIL)*. Surapu Jagan[12], telah membuat *real time* simulator untuk motor induksi dengan konfigurasi HIL dengan menggunakan metode eksplisit Euler untuk penyelesaian persamaan diferensial model dinamik motor induksi. Simulator tersebut dibuat pada modul raspberry pi dan modul I/O NI-DAQ 6009 dengan Bahasa pemrograman Python. Simulator tersebut dapat menampilkan perilaku dinamik motor induksi dalam bentuk grafik dengan menggunakan software matplotlib. Performa simulator tersebut dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan

MATLAB dan menunjukkan hasilnya relatif sama.

Leedy[1], Phukon[2] telah mengimplementasi model dinamik dari motor induksi 3 fase menggunakan MATLAB / Simulink. Model motor yang digunakannya berupa model dengan kerangka acuan dq0. Model dinamik motor induksi yang tersedia Simulink / MATLAB bermanfaat sebagai alat penelitian di laboratorium. Model tersebut merupakan model yang intuitif, mudah digunakan, dan memungkinkan semua parameter motor dapat dengan mudah diakses untuk tujuan monitoring dan perbandingan. Vanijirattikha[4] telah membuat simulator induksi yang dapat dioperasikan dari jarak jauh berbasis web-server. Parameter-parameter motor pada simulator yang dibuatnya dapat disesuaikan dengan kondisi operasi motor yang diinginkan. Simulator tersebut dapat menampilkan karakteristik dinamik dari motor induksi dengan model yang digunakan berupa model dinamik kerangka acuan abc. Lyshevski[10] dalam bukunya menjelaskan tentang model dinamik motor induksi 1 fasa maupun 3 fasa. Model tersebut merupakan model dinamik berbasis pada sirkit elektromagnetik yang dituangkan kedalam bentuk persamaan diferensial Cauchy.

Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan simulator motor induksi 3 fasa dengan karakteristik arus stator dan kecepatan rotor yang sama dengan hasil simulasi karakteristik motor induksi berbasis MATLAB. Simulasi model dinamik motor induksi 3 fasa dibangun berdasarkan modul raspberry pi dengan menggunakan metoda runge-kutta orde empat dan perangkat lunak Python.

2. METODA RUNGE-KUTA DAN MODEL DINAMIK MOTOR INDUKSI TIGA FASA

2.1 Metoda Runge-kutta

Tay[3], metoda penyelesaian permasalahan nilai-awal untuk persamaan orde-satu tunggal dapat diterapkan pada sistem persamaan diferensial orde-satu. Dengan asumsi, nilai untuk semua variabel terikat dapat diperoleh pada nilai-awal yang sama dari variabel bebas. Penyelesaian untuk semua variabel terikat dapat diperoleh pada setiap langkah dari variabel bebas. Permasalahan persamaan diferensial seperti menunjukkan pada (1) dan (2)

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x, y) \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = g(t, x, y) \quad (2)$$

dengan $x(t_0) = x_0$, $y(t_0) = y_0$ dan $t_0 \leq t \leq t_n$. Permasalahan tersebut merupakan sebuah Sistem dari persamaan diferensial orde-satu, yang terdiri dari sepasang persamaan diferensial. domain solusi diskrit t_0 ,

$t_1 = t_0 + h, t_2 = t_1 + h, t_n = t_0 + nh$, dengan h merupakan ukuran langkah dari t . solusi tersebut diperoleh dengan menggunakan metoda Runge-kutta orde empat (RK4) seperti pada (3) dan (4)

$$x_{i+t} = x_i + \frac{1}{6}(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4) \quad (3)$$

$$y_{i+t} = y_i + \frac{1}{6}(g_1 + 2g_2 + 2g_3 + g_4) \quad (4)$$

Dengan $f_1, f_2, f_3, f_4, g_1, g_2, g_3, g_4$ seperti (5) sampai dengan (12)

$$f_1 = hf(t_i, x_i, y_i) \quad (5)$$

$$f_2 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{f_1}{2}, y_i + \frac{g_1}{2}\right) \quad (6)$$

$$f_3 = hf\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{f_2}{2}, y_i + \frac{g_2}{2}\right) \quad (7)$$

$$f_4 = hf(t_i + h, x_i + f_3, y_i + g_3) \quad (8)$$

$$g_1 = hf(t_i, x_i, y_i) \quad (9)$$

$$g_2 = hg\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{f_1}{2}, y_i + \frac{g_1}{2}\right) \quad (10)$$

$$g_3 = hg\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{f_2}{2}, y_i + \frac{g_2}{2}\right) \quad (11)$$

$$g_4 = hg(t_i + h, x_i + f_3, y_i + g_3) \quad (12)$$

2.2 Model Dinamik Motor Induksi Tiga fasa

Lyshevski[10] menjelaskan model dinamik motor induksi 1 fasa maupun 3 fasa berbasis pada sirkit elektromagnetik seperti Gambar 1 yang merupakan motor induksi 3 fasa simetris dengan belitan stator dan rotornya dikonfigurasi bintang. Berbasis pada Gambar 1, persamaan tegangan pada belitan stator dan rotor, arus stator dan rotor serta flux linkage dapat diperoleh dengan menggunakan hukum tegangan Kirchhoff serta dengan menerapkan hukum newton dan prinsip co-energy untuk memperoleh persamaan torca, maka persamaan model dinamik motor induksi diperoleh dalam bentuk persamaan diferensial Cauchy seperti pada (1) sampai dengan (6). Parameter dan satuan yang digunakan dalam karya ilmiah ini, yaitu

P	jumlah kutub
r_s	resistansi belitan Stator [Ω]
r_r	resistansi belitan Rotor [Ω]
L_{ms}	induktansi bersama/mutual Stator-Rotor [H]
L'_{lr}	induktansi bocor [H]
B_m	viscous Friction Coefficient [-]
J	momen inersia motor [kg m^2]
TL0	torsi beban [N-m]

Mag	tegangan yang diterapkan (rms)
Freq	frekwensi dari tegangan yang di terapkan
u_{as}	tegangan fasa pada belitan stator-as [V]
u_{bs}	tegangan fasa pada belitan stator-bs [V]
u_{cs}	tegangan fasa pada belitan stator-cs [V]
u_{ar}	tegangan fasa pada belitan rotor-ar [V]
u_{br}	tegangan fasa pada belitan rotor-br [V]
u_{cr}	tegangan fasa pada belitan rotor-cr [V]
i_{as}	arus pada belitan stator-as [A]
i_{bs}	arus pada belitan stator-bs [A]
i_{cs}	arus pada belitan stator-cs [A]
i'_{ar}	arus pada belitan rotor-ar [A]
i'_{br}	arus pada belitan rotor-br [A]
i'_{cr}	arus pada belitan rotor-cr [A]
ω_r	kecepatan sudut [rad/detik]
θ_r	sudut fasa [rad]
Te	torsi Elektromagnetik [N-m]

$$Y = \frac{1}{L_{\Sigma L}} (AX + BX + CX + DU) \quad (13)$$

Dengan

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{di_{as}}{dt} \\ \frac{di_{bs}}{dt} \\ \frac{di_{cs}}{dt} \\ \frac{di'_{ar}}{dt} \\ \frac{di'_{br}}{dt} \\ \frac{di'_{cr}}{dt} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i'_{ar} \\ i'_{br} \\ i'_{cr} \end{bmatrix} \quad U = \begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \\ u'_{ar} \\ u'_{br} \\ u'_{cr} \end{bmatrix} \quad (14)$$

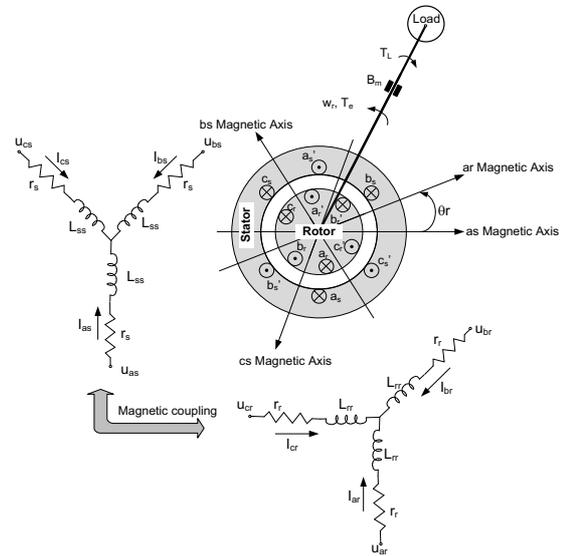
A, B, C dan D pada (13) merupakan matrik 6x6 seperti pada (15), (16), (17) dan (18)

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{15} & A_{16} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{25} & A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{45} & A_{46} \\ A_{51} & A_{52} & A_{53} & A_{54} & A_{55} & A_{56} \\ A_{61} & A_{62} & A_{63} & A_{64} & A_{65} & A_{66} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} & B_{25} & B_{26} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} & B_{35} & B_{36} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} & B_{45} & B_{46} \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} & B_{55} & B_{56} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} & B_{64} & B_{65} & B_{66} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (18)$$



Gambar 1. Motor induksi 3 fasa simetris

dengan elemen-elemen matrik A, B, C dan D sebagai berikut

- 1) $A_{45}, A_{46}, A_{54}, A_{56}, A_{64}, A_{65}, A_{14}, A_{15}, A_{16}, A_{24}, A_{25}, A_{26}, A_{34}, A_{35}, A_{36}, A_{41}, A_{42}, A_{43}, A_{51}, A_{52}, A_{53}, A_{61}, A_{62}, A_{63}$ bernilai nol
- 2) $B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{31}, B_{32}, B_{33}, B_{44}, B_{45}, B_{46}, B_{54}, B_{55}, B_{56}, B_{64}, B_{65}, B_{66}$ bernilai nol
- 3) $C_{11}, C_{22}, C_{33}, C_{44}, C_{55}, C_{66}$ bernilai nol

Elemen-elemen matrik A, B, C dan D yang tidak sama dengan nol dapat dilihat pada (19) sampai dengan (36)

$$A_{11} = A_{22} = A_{33} = A_{44} = A_{55} = A_{66} = -r_s L_{\Sigma m} \quad (19)$$

$$A_{12}, A_{13}, A_{21}, A_{23}, A_{31}, \text{ dan } A_{32} = -\frac{1}{2} r_s L_{ms} \quad (20)$$

$$B_{14} = B_{25} = B_{26} = r_r L_{ms} \cos \theta_r \quad (21)$$

$$B_{41} = B_{52} = B_{63} = r_s L_{ms} \cos \theta_r \quad (22)$$

$$B_{15} = B_{26} = B_{34} = r_r L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (23)$$

$$B_{16} = B_{24} = B_{35} = r_r L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (24)$$

$$B_{42} = B_{53} = B_{61} = r_s L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (25)$$

$$B_{43} = B_{51} = B_{62} = r_s L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (26)$$

$$C_{12} = C_{23} = C_{31} = C_{54} = C_{65} = 1.299 L_{ms}^2 \omega_r \quad (27)$$

$$C_{13} = C_{21} = C_{32} = C_{45} = C_{56} = C_{64} = -1.299 L_{ms}^2 \omega_r \quad (28)$$

$$C_{14} = C_{25} = C_{36} = C_{41} = C_{52} = C_{63} = L_{\Sigma ms} \omega_r \sin \theta_r \quad (29)$$

$$C_{16} = C_{24} = C_{35} = C_{42} = C_{53} = C_{61} = L_{\Sigma ms} \omega_r \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (30)$$

$$C_{15} = C_{26} = C_{34} = C_{43} = C_{51} = C_{62} = L_{\Sigma ms} \omega_r \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (31)$$

$$D_{11} = D_{22} = D_{33} = D_{44} = D_{55} = D_{66} = 2L_{ms} + L_{lr} \quad (32)$$

$$D_{12} = D_{13} = D_{21} = D_{23} = D_{31} = D_{32} = D_{45} = D_{46} = D_{54} = D_{56} = D_{64} = D_{65} = \frac{1}{2} L_{ms} \quad (33)$$

$$D_{14} = D_{25} = D_{36} = D_{41} = D_{52} = D_{63} = -L_{ms} \cos \theta_r \quad (34)$$

$$D_{16} = D_{24} = D_{35} = D_{42} = D_{53} = D_{61} = -L_{ms} \cos\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) \quad (35)$$

$$D_{15} = D_{26} = D_{34} = D_{43} = D_{51} = D_{62} = -L_{ms} \cos\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \quad (36)$$

Dengan nilai $L_{\Sigma L}$, $L_{\Sigma m}$, dan $L_{\Sigma ms}$ dapat dilihat pada (37) sampai dengan (39)

$$L_{\Sigma L} = (3L_{ms} + L'_{lr})L'_{lr} \quad (37)$$

$$L_{\Sigma m} = 2L_{ms} + L'_{lr} \quad (38)$$

$$L_{\Sigma ms} = \frac{3}{2} L_{ms}^2 + L_{ms} L'_{lr} \quad (39)$$

Putaran rotor dihitung menggunakan (40)

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P}{2J} (T_e - T_L) - \frac{B_m}{J} \omega_r \quad (40)$$

dengan

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (41)$$

Torsi rotor dihitung menggunakan (42)

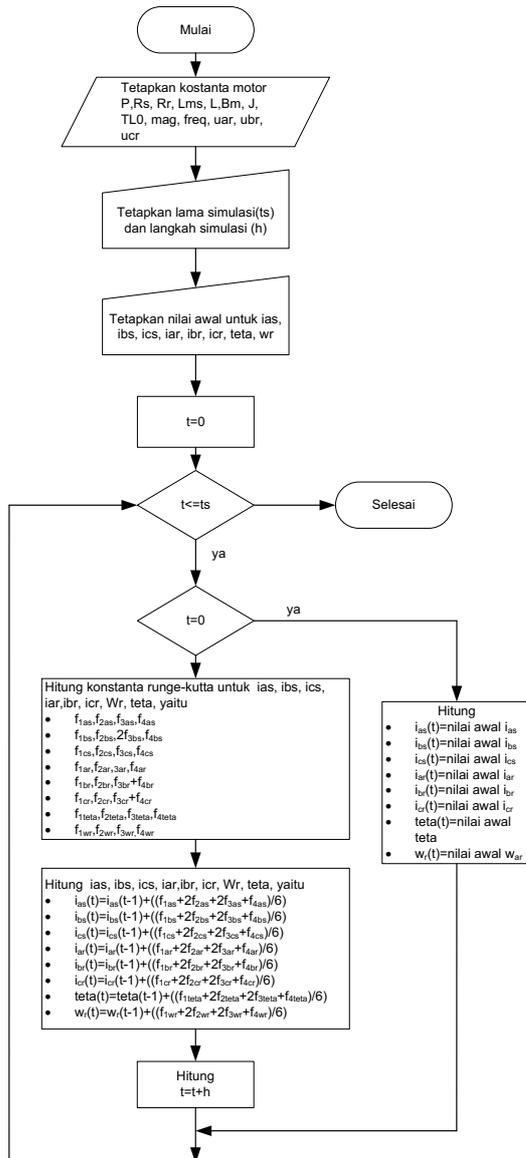
$$T_e = -\frac{P}{2} L_{ms} \left[(i_{as} i_{ar} + i_{bs} i_{br} + i_{cs} i_{cr}) \sin \theta_r + (i_{as} i_{cr} + i_{bs} i_{ar} + i_{cs} i_{br}) \sin\left(\theta_r - \frac{2}{3}\pi\right) + (i_{as} i_{br} + i_{bs} i_{cr} + i_{cs} i_{ar}) \sin\left(\theta_r + \frac{2}{3}\pi\right) \right] \quad (42)$$

3. METODOLOGI PENYELESAIAN

Simulasi dilakukan dengan menggunakan model dinamik motor induksi seperti (13) sampai dengan (42). Modul ODE45 digunakan untuk penyelesaian persamaan diferensial model dinamik motor induksi pada MATLAB. ODE45 merupakan salah satu modul yang tersedia pada MATLAB untuk penyelesaian persamaan diferensial dengan berbasis pada metoda runge-kutta. Simulasi menggunakan MATLAB dilakukan pada laptop dengan system operasi windows. Sedangkan simulasi menggunakan Python dilakukan pada raspberry-pi dengan system operasi raspbian (linux) serta penyelesaian persamaan diferensial yang digunakan metoda runge-kutta seperti (1) sampai dengan (12) dan algoritma penyelesaian persamaan diferensial model dinamik motor induksi dapat dilihat pada Gambar 2.

Motor induksi yang digunakan jenis rotor sangkar sehingga tegangan rotornya bernilai nol untuk semua fasanya. Waktu simulasi yang diterapkan nol sampai dengan satu detik dengan interval waktu 0,001 detik. Motor mulai dibebani ketika waktu $t \geq 0.7$ detik. Kondisi tersebut dianggap cukup untuk membandingkan antara hasil simulasi menggunakan MATLAB dan Python pada raspberry-pi, karena pada saat satu detik motor dapat mencapai keadaan tunak dengan parameter-parameter motor yang digunakan sebagai berikut [10]:

- 1) Jumlah kutub 2
- 2) resistansi belitan Stator 0.3 Ω
- 3) resistansi belitan Rotor 0.2 Ω
- 4) induktansi bersama/mutual Stator-Rotor 0.035 H
- 5) induktansi bocor 0.003 H
- 6) *Viscous Friction Coefficient* 0.001
- 7) momen inersia 0.02 kg m²
- 8) torsi beban 40 N-m
- 9) tegangan yang diterapkan (rms) 220 V
- 10) frekwensi dari tegangan yang di terapkan 60 Hz



Gambar 2. Flowchart penyelesaian persamaan defensial motor induksi 3 fasa dengan metoda RK4

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

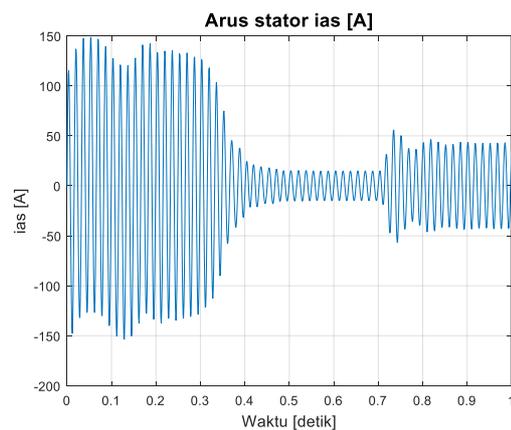
Persamaan deferential *stiff* merupakan permasalahan metoda eksplisit tidak dapat bekerja dan tidak stabil secara numerik kecuali pada interval yang sangat kecil[13]. Jenis persamaan deferential tersebut sifatnya tidak unik sehingga relatif sulit diidentifikasi sejak dini. Terjadinya perbedaan hasil simulasi antara MATLAB dengan simulasi menggunakan Python disebabkan persamaan dinamik motor induksi yang digunakan merupakan jenis persamaan deferential *stiff*. hal tersebut dapat dilihat dengan cara mengubah interval waktu yang diterapkan pada penyelesaian persamaan diferensial model dinamik motor, yaitu ketika intervalnya diperbesar menjadi 0.1 detik maka terjadi peringatan/catatan dari

software yang digunakan pada saat dikompail. Hal tersebut terjadi ketika disimulasikan menggunakan Python maupun MATLAB. Selain itu, perbedaan hasil simulasi dikarenakan pembulatan atau jenis variabel yang digunakan pada saat perhitungan/komputasi.

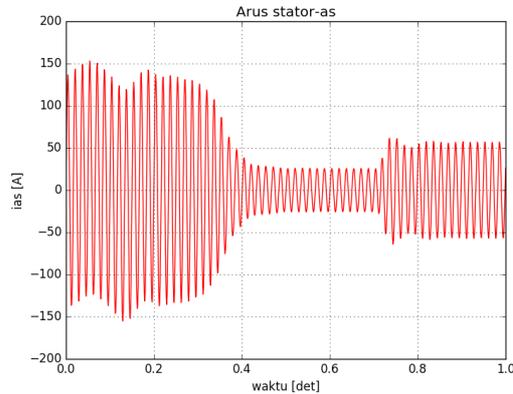
4.1. Hasil Simulasi Arus Stator Fasa-a

Gambar 3 dan 4 merupakan grafik yang menunjukkan perubahan nilai arus stator fasa-a yang diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB dan Python. Berdasarkan Gambar 3 dan 4 dengan pengamatan pada saat nol detik sampai dengan sebelum 0.7 detik (kondisi tidak motor tidak berbeban) menunjukkan pola grafik yang relative identik, sedangkan perbandingan arus sesaatnya sebagai berikut:

- 1) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat tertinggi 148.5196 A pada saat 0.054 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat terbesar 148.5004 A pada saat 0.54 detik.
- 2) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terkecil -153.528 A pada saat 0.129 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat tertinggi -153.54 A pada waktu 0.129 detik.
- 3) Ditinjau dari besarnya arus *peak to peak* pada kondisi tunak, simulasi menggunakan Python memiliki arus *peak-to-peak* sebesar 27.9663 A dan 29.633 A untuk simulasi menggunakan MATLAB. Hasil perbandingan arus stator fasa-a dengan kondisi motor tidak berbeban dapat dilihat juga pada Tabel 1.



Gambar 3. grafik arus stator fasa-a (disimulasikan menggunakan MATLAB)



Gambar 4. Grafik arus stator fasa-a (simulasikan menggunakan Python pada raspberry pi)

Perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-a dengan kondisi motor berbeban dilakukan pengamatan pada saat 0.7 detik hingga satu detik pada Gambar 3 dan 4, menunjukkan pola grafik yang relatif identik, sedangkan perbandingan arus sesaatnya sebagai berikut:

- 1) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat tertinggi 55.9647 A pada saat 0.735 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat terbesar 55.96049 A pada saat 0.735 detik.
- 2) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terkecil -56.8588 A pada saat 0.129 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat tertinggi -56.7102 A pada waktu 0.743 detik.
- 3) Ditinjau dari besarnya arus *peak to peak* pada kondisi tunak, simulasi menggunakan Python memiliki arus-peak-to-peak sebesar 93.4379 A dan 85.4539 A untuk simulasi menggunakan MATLAB. Hasil perbandingan arus stator fasa-a dengan kondisi motor berbeban dapat dilihat juga pada Tabel 2.

Tabel 1. Perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-a kondisi tidak berbeban

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	Arus sesaat terbesar [A]	148.519	148.500	0.019	0.01%
2	Arus sesaat terkecil [A]	-153.528	-153.540	0.012	0.01%
3	Arus <i>Peak to peak</i> pada kondisi tunak [A]	27.966	29.633	1.666	5.62%
4	Lama waktu transien (detik)	0.480	0.480	0.000	0.00%

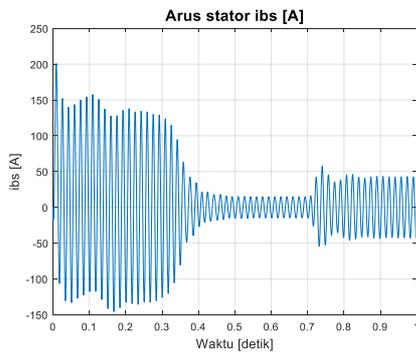
Tabel 2. Perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-a kondisi berbeban

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	Arus sesaat terbesar [A]	55.9647	55.9605	0.004	0.01%
2	Arus sesaat terkecil [A]	-56.8588	-56.7102	0.148	0.26%
3	Arus <i>Peak to peak</i> pada kondisi tunak [A]	93.4379	85.4539	7.984	9.34%
4	Lama waktu transien (detik)	0.100	0.100	0.000	0.00%

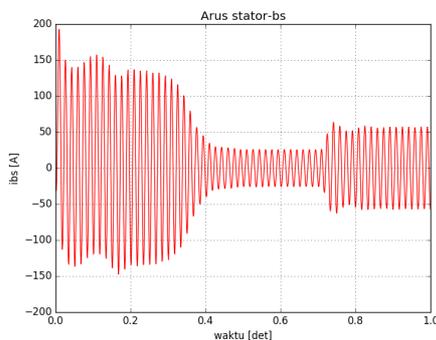
4.2. Hasil Simulasi Arus Stator Fasa-b

Gambar 5 dan 6 merupakan grafik yang menunjukkan perubahan nilai arus stator fasa-b yang diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB dan Python. Berdasarkan Gambar 5 dan 6, jika ditinjau secara visual kedua grafik tersebut dapat dikatakan polanya relatif mirip baik dalam kondisi berbeban (0.7 detik sampai dengan satu detik) maupun kondisi tidak berbeban (nol sampai dengan sebelum 0.7 detik). Jika ditinjau secara besaran arus sesaatnya pada kondisi motor tidak berbeban, yaitu:

- 1) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terbesar 200.6644 A pada waktu 0.009 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat terbesar 148.5004 pada waktu 0.009 detik.
- 2) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terkecil -145.602 A pada waktu 0.167 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat tertinggi -145.724 A pada waktu 0.167 detik.
- 3) Ditinjau dari besarnya arus *peak to peak* pada kondisi tunak, simulasi menggunakan Python memiliki arus-peak-to-peak sebesar 0.0190 A dan 0.0010 A untuk simulasi menggunakan MATLAB. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat juga pada Tabel 3.



Gambar 5. Grafik arus stator fasa-b (disimulasikan menggunakan MATLAB)



Gambar 6. Grafik arus stator fasa-b (simulasikan menggunakan Python pada raspberry pi)

Tabel 3. Perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-b kondisi motor tidak berbeban

No	Variabel	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	Arus sesaat terbesar [A]	200.66	200.663	0.00	0.00 %
2	Arus sesaat terkecil [A]	-145.602	-145.724	0.12	0.08 %
3	Arus Peak to peak pada kondisi tunak [A]	27.981	29.538	1.55	5.27 %
4	Lama waktu transien (detik)	0.480	0.480	0.00	0.00 %

Hasil perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-b dengan kondisi motor berbeban dapat dilihat pada Tabel 4 dan jelaskan sebagai berikut:

- 1) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terbesar 57.045 A pada waktu 0.74 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat terbesar 57.441 A pada waktu 0.74 detik.

- 2) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terkecil -54.126 A pada waktu 0.749 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat tertinggi -54.458 A pada waktu 0.749 detik.
- 3) Ditinjau dari besarnya arus *peak to peak* pada kondisi tunak, simulasi menggunakan Python memiliki arus *peak-to-peak* sebesar 93.972 A dan 85.344 A untuk simulasi menggunakan MATLAB

Tabel 4. Perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-b kondisi motor berbeban

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	Arus sesaat terbesar [A]	57.045	57.441	0.395	0.69%
2	Arus sesaat terkecil [A]	-54.126	-54.458	0.332	0.61%
3	Arus Peak to peak pada kondisi tunak [A]	93.972	85.344	8.629	10.11%
4	Lama waktu transien (detik)	0.100	0.100	0.000	0.00%

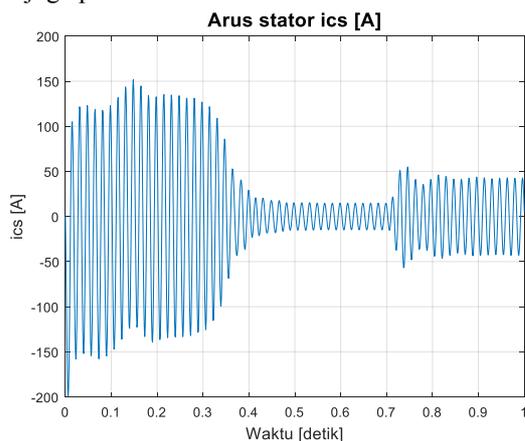
4.3. Hasil Simulasi Arus Stator fasa-c

Gambar 7 dan 8 merupakan grafik yang menunjukkan perubahan nilai arus stator-c yang diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB dan Python. Berdasarkan Gambar 7 dan 8 secara visual kedua grafik tersebut dapat dikatakan polanya mirip baik untuk kondisi berbeban maupun tidak berbeban. Jika ditinjau secara besaran arus sesaatnya pada kondisi motor tidak berbeban, yaitu:

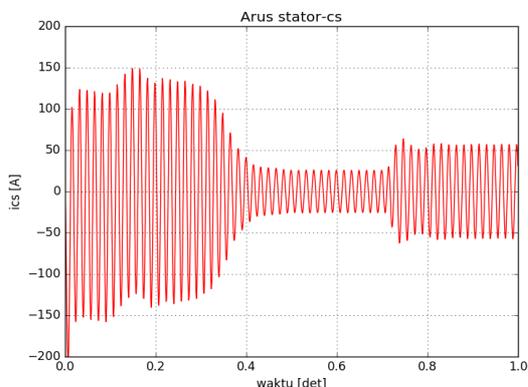
- 1) simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat tertinggi 151.572 A pada waktu 0.148 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat terbesar 151.605 pada waktu 0.148 detik.
- 2) simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terkecil -199.350 A pada waktu 0.006 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat tertinggi -199.349 A pada waktu 0.006 detik.
- 3) Ditinjau dari besarnya arus *peak to peak* pada kondisi tunak, simulasi menggunakan Python memiliki arus *peak-to-peak* sebesar 28.151 A dan 29.716 A untuk simulasi menggunakan MATLAB. Hasil perbandingan dapat dilihat juga pada Tabel 5.

Perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-c dengan kondisi motor berbeban dilakukan pengamatan pada saat 0.7 detik hingga satu detik pada Gambar 7 dan 8, perbandingan arus sesaatnya sebagai berikut:

- 1) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat tertinggi 55.809 A pada saat 0.746 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat terbesar 54.994 A pada saat 0.746 detik.
- 2) Simulasi menggunakan Python menghasilkan arus sesaat terkecil -56.547 A pada saat 0.737 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan arus sesaat tertinggi -56.955 A pada waktu 0.737 detik.
- 3) Ditinjau dari besarnya arus *peak to peak* pada kondisi tunak, simulasi menggunakan Python memiliki arus *peak-to-peak* sebesar 93.471 A dan 85.700 A untuk simulasi menggunakan MATLAB. Hasil perbandingan arus stator fasa-c dengan kondisi motor berbeban dapat dilihat juga pada Tabel 6.



Gambar 7. Grafik arus stator fasa-c (disimulasikan menggunakan MATLAB)



Gambar 8. Grafik arus stator fasa-c (simulasikan menggunakan Python pada raspberry pi)

Tabel 5. perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-c kondisi motor tidak berbeban

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	Arus sesaat terbesar [A]	151.572	151.605	0.034	0.02%
2	Arus sesaat terkecil [A]	-199.350	-199.349	0.001	0.00%
3	Arus <i>Peak to peak</i> pada kondisi tunak [A]	28.151	29.716	1.564	5.26%
4	Lama waktu transien (detik)	0.480	0.480	0.000	0.00%

Tabel 6. perbandingan hasil simulasi arus stator fasa-c kondisi motor berbeban

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	Arus sesaat terbesar [A]	55.809	54.994	0.815	1.48%
2	Arus sesaat terkecil [A]	-56.547	-56.955	0.408	0.72%
3	Arus <i>Peak to peak</i> pada kondisi tunak [A]	93.471	85.700	7.771	9.07%
4	Lama waktu transien (detik)	0.100	0.100	0.000	0.00%

4.4. Hasil Simulasi Kecepatan Rotor

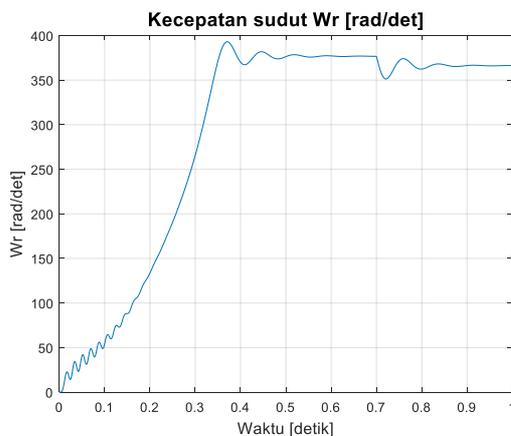
Gambar 9 dan 10 merupakan hasil simulasi kecepatan rotor menggunakan MATLAB dan Python dengan hasil perbandingannya seperti menunjukkan pada Tabel 7 dan 8. perbandingan hasil simulasi putaran rotor dengan kondisi motor tanpa bebap sebagai berikut

- 1) Simulasi menggunakan Python menghasilkan kecepatan sesaat terbesar 385.291 rad/detik pada saat 0.371 detik. Sedangkan simulasi menggunakan MATLAB menghasilkan putaran sesaat 339.00 rad/detik pada waktu 0.371 detik.
- 2) Hasil simulasi putaran sesaat terkecil nol rad/detik baik simulasi menggunakan MATLAB maupun Python pada saat nol detik.
- 3) Hasil simulasi putaran rotor pada pada kondisi tunak 376.460 rad/detik untuk simulasi menggunakan Python sedangkan simulasi menggunakan MATLAB 376.814 rad/detik. Hal ini menunjukkan perbedaan 0.09%.

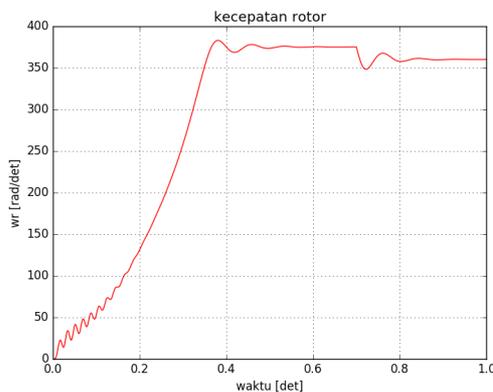
Perbandingan hasil simulasi putaran rotor dengan kondisi motor berbeban sebagai berikut

- 1) Simulasi menggunakan Python menghasilkan kecepatan sesaat terbesar 375.740 rad/detik pada saat 0.7 detik. Sedangkan simulasi

- menggunakan MATLAB menghasilkan putaran sesaat 376.654 rad/detik pada waktu 0.7 detik.
- 2) Simulasi menggunakan Python menghasilkan putaran sesaat terkecil 350.350 rad/detik pada saat 0.722 detik. sedangkan simulasi menggunakan MATLAB 351.233 rad/detik pada saat nol detik.
 - 3) Hasil simulasi putaran rotor pada pada kondisi tunak 376,460 rad/detik untuk simulasi menggunakan Python sedangkan simulasi menggunakan MATLAB 376.814 rad/detik. Hal ini menunjukkan perbedaan 0.09%



Gambar 9. Grafik kecepatan sudut (disimulasikan menggunakan MATLAB)



Gambar 10. Grafik kecepatan sudut fungsi waktu pada kondisi motor induksi berbeban (simulasikan menggunakan Python pada raspberry pi)

Tabel 7. perbandingan hasil simulasi kecepatan rotor kondisi motor tidak berbeban

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	putaran sesat terbesar [rad/det]	385.291	339.003	46.288	13.65%

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
2	putaran sesaat terkecil [rad/det]	0.000	0.000	0.000	0%
3	putaran kondisi tunak [rad/det]	376.460	376.814	0.354	0.09%
4	Lama waktu transien (detik)	0.600	0.600	0.000	0.00%

Tabel 8. perbandingan hasil simulasi kecepatan rotor kondisi motor berbeban

No	Variable	Perangkat lunak yang digunakan		selisih absolut	
		Python	MATLAB		
1	putaran sesat terbesar [rad/det]	375.740	376.654	0.914	0.24%
2	putaran sesaat terkecil [rad/det]	350.350	351.233	0.884	0.25%
3	putaran kondisi tunak [rad/det]	363.154	366.230	3.076	0.84%
4	Lama waktu transien (detik)	0.200	0.200	0.000	0.00%

5. KESIMPULAN

Berdasarkan proses yang telah di paparkan sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut

- 1) Hasil simulasi yang dilakun dapat menghasilkan data arus stator dan putaran rotor yang polanya relatif sama dengan hasil simulasi menggunakan MATLAB dan Python dengan perbedaan lebih kecil dari 11% untuk arus stator dan 14% untuk putaran rotor.
- 2) Hasil simulasi dapat dipengaruhi oleh *step* atau langkah yang digunakan pada penyelesaian persamaan diferensial serta model dinamik yang berkaitan dengan persamaan deferential *stiff*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aleck W. Leedy, "Simulink/MATLAB Dynamic Induction Motor Model for Use as A Teaching and Research Tool", *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, ISSN: 2231-2307, Volume-3, Issue-4, September, 2013
- [2] Lakhya Jyoti Phukon, Neelanjana Baruah, "A Generalized MATLAB Simulink Model of a Three Phase Induction Motor", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO 3297:*



- 2007 Certified Organization), Vol. 4, Issue 5, May 2015
- [3] Kim Gaik Tay, Sie Long Kek, Rosmila Abdulkahar, "A Spreadsheet Solution of a System of Ordinary Differential Equations Using the Fourth-Order Runge-Kutta Method", *Spreadsheets in Education (eJSiE)*, Vol. 5: Iss. 2, Article 5, 2012
 - [4] Rangsarit Vanijjirattikha, Bulent Ayha, Yodyium Tipsuwan, Mo-Yuen Chow, "A Web-Based Distributed Dynamics Simulation of a Three-Phase Induction Motor "Proceedings of NSF Workshop on Teaching of First Courses on Power Electronics and Electric Drives and Advance Course on Power System Applications of Power Electronics, Tempe, Arizona, 1-21, 2003
 - [5] SNI 225:2011, "Persyaratan Umum Instalasi Listrik", 2011
 - [6] I. Boldea, L. Tutelea and Klumpner C., "Artificial loading of induction machines: a review", *Workshop on Electrical Machine's Parameters, Technical University of Cluj-Napoca*, 26th of May, 2001, pp. 9-14
 - [7] Charles s, G.Bhuvameswari, "Power Quality Studies on a Soft-Starter for an Induction Motor", *International Journal of recent Trends in Engineering*, Vol 1, No. 3, May 2009
 - [8] Ridwan Gunawan, Feri Yuvisal, Wahidin wahab, dan Zuhul A. Kadir," Perancangan Putaran Motor Induksi Tiga Fasa Tanpa Sensor Kecepatan dengan Vektor Arus dan Full reduced observer berada pada sumbu DQ", *Makara*, vol. 10, no. I, April 2006
 - [9] Ogonnaya I. Okoro, "Dynamic modeling and Simulation of Squirrel-cage asynchronous machine with non-linear effects", *Rev. ciênc. exatas, Taubaté*, v. 12, n. 1, p. 71-77, 2006
 - [10] Sergey E. Lyshevski, "Electro mechanical Systems and Diveces", *CRC Press*, 2008, ISBN: 978-1-4200-6972-3, p.252-292
 - [11] J. Bélanger, J.-N. Paquin, "The What, Where and Why of Real-Time Simulation", *Planet RT*, 2010
 - [12] Surapu Jagan, "Real-time simulation of three phase Induction motor using Raspberry Pi", *Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology Rourkela Odisha, 769008, India, May 2015*
 - [13] Ramin S. Esfandiari, Numerical Methods for Engineers and Scientists Using MATLAB, *CRC Press*, 2013, ISBN: 978-1-4665-8570-6, p. 374