

METODE PENENTUAN RUGI-RUGI HISTERESIS PADA PENGATURAN MOTOR INDUKSI BERBASIS VECTOR CONTROL

Novrian Eka Sandhi*, Era Purwanto*, Dedid Cahya Happyanto*, Ridwan W.K.#, Handri Toar#

*Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS)

Kampus PENS, Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur 60117

e-mail: ne.sandhi@gmail.com, era@pens.ac.id, dedid@pens.ac.id

#Politeknik Negeri Batam (POLIBATAM)

Batam Centre, Jl. Ahmad Yani, Teluk Tering, Kota Batam, Kepulauan Riau 29461

e-mail: toar@polibatam.ac.id, ridwan_wk@yahoo.co.id

Abstrak

Motor induksi tiga fasa memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan motor jenis arus searah. Keunggulan utama dari motor induksi di antaranya torsi yang besar dan kemudahan perawatan. Karena itu motor induksi sangat diandalkan sebagai penggerak utama di bidang industri maupun transportasi. Dalam meningkatkan kinerja operasi motor induksi, telah dikembangkan teknik pengendalian motor induksi yang berbasis *vector control*. Lewat teknik tersebut motor induksi dapat dioperasikan pada berbagai tingkat kecepatan. Sektor transportasi perkotaan juga mulai menggunakan motor induksi sebagai penggerak kendaraan jenis roda empat maupun roda dua. Dikarenakan kendaraan membawa sumber daya listrik dalam baterai atau aki yang kuantitasnya terbatas maka riset *vector control* dewasa ini diarahkan pada peningkatan skema pengendalian yang tujuan akhir menambah jarak tempuh dan umur pakai motor induksi. Di antara faktor yang menunjang keperluan tersebut adalah evaluasi rugi-rugi yang terjadi pada operasional motor induksi. Pada operasi kecepatan rendah, rugi histeresis sebagai akibat dari gejala magnetisasi inti stator menempati faktor yang dominan. Riset ini mengajukan suatu desain metode penentuan rugi histeresis pada motor induksi yang dikendalikan dengan teknik *vector control* lewat prosedur teknis yang sederhana dan aplikatif. Pada unit motor induksi yang digunakan sebagai bahan uji simulasi diperoleh nilai rugi besi P_{Fe} berkisar antara $2,55 \times 10^{-8}$ hingga $1,09 \times 10^3$ Watt. Sedangkan nilai rugi histeresis P_h berkisar antara $2,07 \times 10^{-8}$ hingga $5,15 \times 10^2$ Watt. Rasio rugi histeresis P_h terhadap rugi besi P_{Fe} antara 47,09 % hingga 81,18 %.

Kata Kunci: motor induksi tiga fasa, *vector control*, rugi inti stator, rugi histeresis.

Abstract

Compared to direct current (DC) motors, the three-phase induction motors have several advantages such as: big torque, low maintenance cost, and rugged. For those reasons, induction motors are dependable as the prime mover in industrial and transportation sectors. In order to increase the performance of induction motors, a vector control based driving method had been developed to operate the induction motors in various level of speed. Some manufacturers begin to use induction motors as the mover of 2 or 4-wheeled electric vehicles in city/urban transportation. Due to restricted capacity of battery as the power source, many researches on vector control are now focussed on advancing the driving scheme which in turn increasing mileage and lifetime of induction motors. One factor which supports that purpose is the evaluation of losses occurred during induction motor operation. During low speed operation, hysteresis loss as a consequence of stator core magnetization phenomenon takes a major part of overall losses. This research proposed a simple and applicable design of hysteresis loss determination on induction motor controlled by vector control scheme. The simulation using particular induction motor as a sample found that the iron loss P_{FE} ranged between $2,55 \times 10^{-8}$ to $1,09 \times 10^3$ Watt, the hysteresis loss P_h ranged between $2,07 \times 10^{-8}$ to $5,15 \times 10^2$ Watt, and the hysteresis loss to iron loss rate ranged between 47,09 % to 81,18 %.

Keywords: 3-phase induction motor, vector control, stator core losses, hysteresis loss.

1. Pendahuluan

Upaya peningkatan efisiensi pada pengoperasian motor listrik yang dikemudikan dengan kecepatan bervariasi (*variable speed drive*) mendapatkan banyak perhatian para peneliti di seluruh dunia. Diperkirakan lebih dari 50% energi listrik di seluruh dunia dihabiskan oleh mesin-mesin listrik [1], baik di sektor industri maupun sektor transportasi. Oleh karena itu setiap upaya untuk memperkecil rugi-rugi (*losses*) pada pengoperasian mesin listrik sangat dibutuhkan dalam rangka menjawab tantangan penghematan energi, efisiensi dari sisi ekonomi, maupun pengurangan dampak pencemaran lingkungan. Motor induksi, terutama tipe sangkar tupai (*squirrel-cage*) yang dikemudikan dengan metode *vector control*, mendominasi penggunaan penggerak listrik di dunia industri sehingga dipandang sebagai perangkat yang mengkonsumsi energi listrik paling dominan dibandingkan dengan jenis perangkat yang lain. Untuk keperluan sebagai penggerak mobil-mobil listrik, motor induksi memiliki keunggulan di antaranya: efisiensi tinggi, densitas daya tinggi, fitur pengereman regeneratif (*regenerative braking*), tangguh, dan perawatan yang minim [2].

Motor induksi dirancang untuk beroperasi pada nilai torsi dan kecepatan kerja nominal tertentu yang telah ditetapkan oleh pabrik. Pada nilai torsi dan kecepatan kerja tersebut diperoleh tingkat efisiensi yang tinggi dengan rugi-rugi yang minimum, terutama jika motor induksi dioperasikan pada kecepatan dan/atau torsi yang konstan. Namun untuk memenuhi dinamika kebutuhan yang tinggi sebagai penggerak dalam sektor industri maupun transportasi, motor-motor induksi harus dapat dioperasikan pada berbagai kondisi dengan kecepatan yang bervariasi (*adjustable speed drive*) yang menyebabkan turunnya tingkat efisiensi sebagai akibat dari meningkatnya rugi-rugi.

Faktor-faktor penyebab rugi-rugi pada motor induksi terdiri dari: *stator copper losses*, *rotor copper losses*, *iron losses*, *stray losses*, dan *mechanical losses* (akibat gesekan dan lilitan kumparan). Dari keseluruhan faktor rugi-rugi tersebut, *copper losses* (baik pada stator maupun rotor) dan *iron losses*, keduanya disebut sebagai *electromagnetic losses*, menyumbang porsi terbesar hingga mencapai 80% [3]. *Copper losses* (rugi Cu) diakibatkan oleh aliran arus yang mengalir pada lilitan stator dan batang rotor serta bergantung pada nilai resistansi bahan. *Iron losses* (rugi Fe) disebabkan oleh histeresis dan arus eddy yang bergantung langsung pada besarnya fluks magnetik. Dengan melakukan penyesuaian yang tepat terhadap harga fluks, maka akan diperoleh keseimbangan yang pas antara rugi Fe dengan rugi Cu [4].

Pada pengoperasian putaran rendah, rugi Fe berkontribusi signifikan bagi rugi motor maupun kinerja motor secara keseluruhan. Umumnya para

peneliti menggunakan analisis *Finite Element* (FE) untuk melakukan studi terhadap rugi Fe. Namun dikarenakan kompleksitas dan model matematis yang bersifat umum yang harus memasukkan berbagai faktor koreksi untuk berbagai jenis motor listrik, rugi Fe kerap dikecualikan dalam analisis [5]. Sedangkan komponen rugi Fe yang berkontribusi besar pada operasi motor putaran rendah adalah rugi histeresis [6].

Makalah ini menyajikan upaya menentukan rugi Fe dengan menemukan *hysteresis loss* (rugi histeresis) secara praktis dan aplikatif menggunakan bantuan Matlab Simulink.

2. Rugi-Rugi Pada Motor Induksi

Rugi-rugi pada motor induksi dapat diuraikan menjadi beberapa komponen, yaitu: *copper loss*, *iron loss*, dan *mechanical loss* yang dinyatakan ke dalam persamaan-persamaan sebagai berikut [1]:

$$P_{Fe} = 1,5[K_h \omega_e \varphi_m^2 + K_e \omega_e^2 \varphi_m^2] \quad (1)$$

$$P_{Cu} = 1,5[(I_{qs}^2 + I_{ds}^2)R_s + (I_{qr}^2 + I_{dr}^2)R_r] \quad (2)$$

$$P_{Me} = K_m \omega_r^2 \quad (3)$$

dengan:

- P_{Fe} = rugi Fe (*iron losses*)
- P_{Cu} = rugi Cu (*copper losses*)
- P_{Me} = rugi mekanis (*mechanical losses*)
- K_h = koefisien rugi akibat histeresis
- K_e = koefisien rugi akibat *eddy-current*
- K_m = koefisien rugi mekanis
- I_{ds} = arus stator pada *d-axis*
- I_{qs} = arus stator pada *q-axis*
- I_{dr} = arus rotor pada *d-axis*
- I_{qr} = arus rotor pada *q-axis*
- R_s = hambatan stator
- R_r = hambatan rotor
- ω_e = kelajuan putaran sinkron
- ω_r = kelajuan putaran rotor
- φ_m = fluks tautan (*flux linkage*)

Rugi Fe (P_{Fe}) terdiri dari dua komponen, yaitu: rugi akibat gejala histeresis (P_{hys}) dan rugi akibat *eddy-current* (P_{ec}) sebagaimana dideskripsikan pada Persamaan (1) tersebut. Dengan mensubstitusikan $\varphi_m = L_m I_{ds}$ yang berlaku pada kondisi *steady-state*, Persamaan (1) dimodifikasi menjadi:

$$P_{Fe} = 1,5[K_h \omega_e + K_e \omega_e^2]L_m^2 I_{ds}^2 \quad (4)$$

dengan:

- L_m = induktansi magnetisasi

Parameter I_{ds} merupakan bagian dari skema pengemudian *vector control*.

Persamaan (4) menunjukkan bahwa rugi histeresis dan rugi *eddy-current* berbanding lurus dengan kuadrat I_{ds} . Namun, rugi histeresis berbanding lurus dengan kelajuan putaran sinkron ω_e sedangkan rugi

eddy-current berbanding lurus dengan kuadrat ω_e , dengan $\omega_e = \omega_{slip} + \omega_r$.

Sehingga pada operasional frekuensi angular tinggi rugi *eddy-current* menjadi lebih dominan dibandingkan dengan rugi histeresis [7]. Sedangkan pada frekuensi angular rendah, rugi histeresis memberikan kontribusi yang dominan pada rugi Fe secara total.

3. Modifikasi Model Steinmetz

Separasi rugi Fe ke dalam komponen rugi histeresis, rugi *eddy-current*, dan rugi lain-lain (*excess losses*) sebelumnya pernah dilakukan oleh berbagai peneliti. Di antaranya oleh [8] yang melibatkan analisis matematis terhadap model Steinmetz dengan langkah-langkah yang cukup rumit. Pada penelitian ini juga menggunakan model Steinmetz sebagai titik tolak. Namun terdapat langkah-langkah simplifikasi agar diperoleh metode yang praktis dan aplikatif untuk diterapkan di lapangan. Selanjutnya, untuk mendapatkan koefisien rugi histeresis (K_h) dan koefisien rugi *eddy-current* (K_e) digunakan aplikasi pencocokan kurva dengan model persamaan yang diajukan oleh Steinmetz, yaitu:

$$P_{Fe} = K_h f B_{max}^\alpha + K_e f^2 B_{max}^2 + K_{ex} f^{1.5} B_{max}^{1.5} \quad (5)$$

dengan:

f = frekuensi

B_{max} = kerapatan fluks magnetik maksimum

K_{ex} = koefisien rugi lain-lain (*excess losses*)

Suku pertama dari Persamaan (5) adalah rugi histeresis dengan α berupa konstanta yang bervariasi antara 1,5 hingga 2,5 [6], suku kedua adalah rugi *eddy-current*, dan suku ketiga adalah rugi lain-lain (*excess losses*). Pada model Steinmetz tersebut, B_{max} berbanding lurus dengan arus magnetisasi maksimum ($I_{m,max}$). Untuk menentukan secara lengkap nilai kerapatan fluks magnetik B dibutuhkan informasi tentang jumlah lilitan (N), dan panjang atau keliling inti stator (l). Sehingga secara lengkap B dinyatakan sebagai:

$$B = (\mu_0 N / l) I_m \quad (6)$$

$$B_{max} = (\mu_0 N / l) I_{m,max} \quad (7)$$

Tetapan μ_0 adalah permeabilitas udara sebesar $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. Dikarenakan informasi lengkap tentang suatu unit motor induksi sangat jarang tersedia dan agar analisa menjadi lebih aplikatif, pernyataan B_{max} disederhanakan menjadi:

$$B_{max} = \zeta I_{m,max} \quad (8)$$

Simbol ζ (baca: zeta) digunakan untuk menggantikan $\mu_0 N / l$ yang merupakan karakteristik unik dari setiap motor induksi, sehingga sekarang B_{max} merupakan fungsi dari arus $I_{m,max}$, yang dinyatakan sebagai:

$$I_{m,max} = I_{NL} \sqrt{2} \sin \varphi \quad (9)$$

dengan:

I_{NL} = arus suplai motor induksi dalam keadaan tanpa beban (*no-load*)

φ = sudut

Sehingga model Steinmetz ditulis ulang menjadi:

$$P_{Fe} = K_h f \zeta^\alpha I_{m,max}^\alpha + K_e f^2 \zeta^2 I_{m,max}^2 + K_{ex} f^{1.5} \zeta^{1.5} I_{m,max}^{1.5} \quad (10)$$

Kelebihan penggunaan model Steinmetz yang dimodifikasi tersebut adalah dimensi-dimensi inti stator (jumlah lilitan dan keliling inti stator) tidak perlu diketahui, dengan catatan motor induksi yang digunakan tidak mengalami perubahan atau penggantian unit. Jika ternyata jumlah lilitan dan keliling inti stator diketahui, maka perhitungan dapat dilengkapi.

4. Metodologi

4.1 Parameter Motor Induksi

Bentuk fisik motor induksi tiga fasa yang digunakan seperti pada Gambar 1, sedangkan parameter elektriknya tertera pada Tabel I.

Tabel I. Parameter Motor Induksi.

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Hambatan stator	R_s	5,27	Ω
2	Hambatan rotor	R_r	3,40	Ω
3	Induktansi stator	L_s	4,33	mH
4	Induktansi rotor	L_r	6,46	mH
5	Induktansi magnetisasi	L_m	270	mH
6	Arus rugi Fe	I_{Fe}	0,27	A
7	Hambatan rugi Fe	R_{Fe}	471,30	Ω
8	Tegangan <i>line-line rms</i>	V_{LL}	220,00	V
9	Frekuensi	f	50,00	Hz
10	Daya nominal	P_n	1102,50	W
11	Pasangan <i>pole</i>	p	4	<i>pairs</i>

(catatan: parameter nomor 1 hingga 9 adalah nilai per fasa)



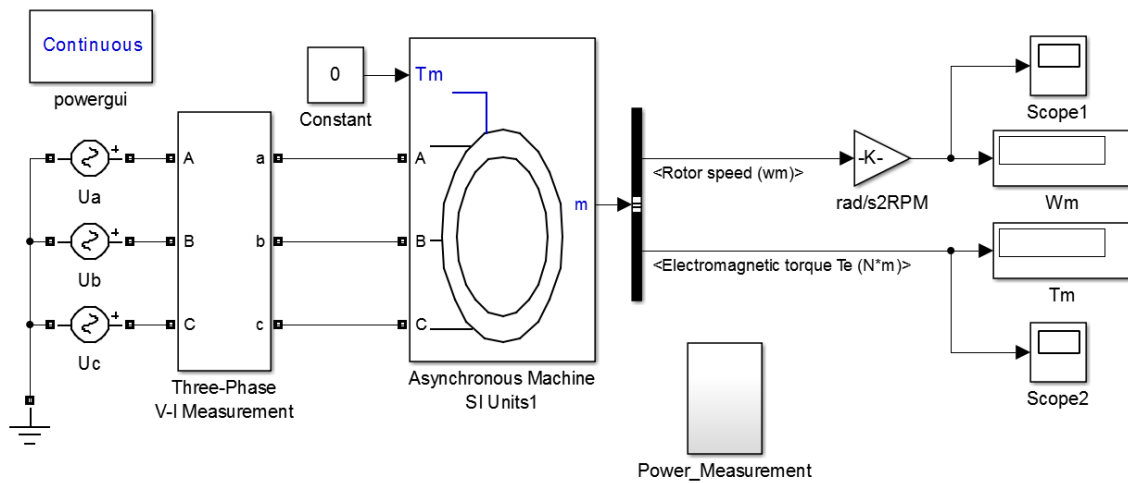
Gambar 1. Bentuk fisik motor induksi tiga fasa yang diuji.

4.2 Simulasi uji motor induksi tanpa beban dengan sumber sinusoidal

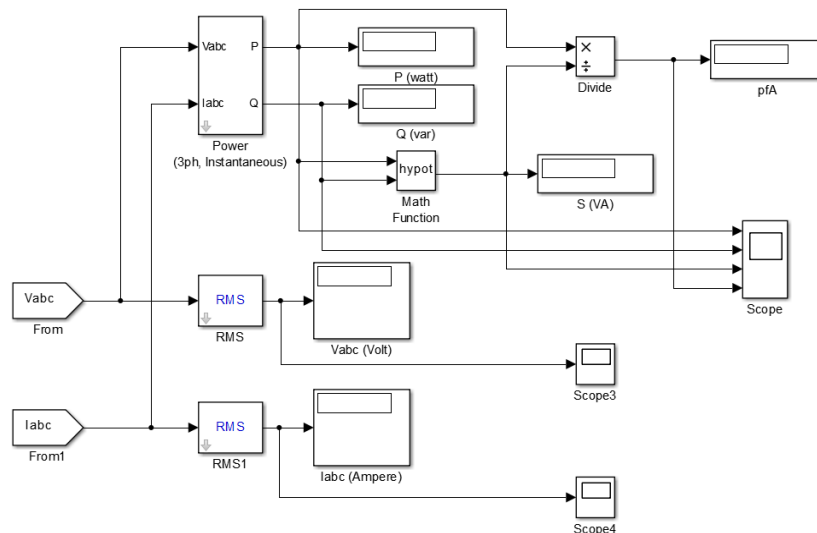
Simulasi uji motor induksi tanpa beban dengan sumber tegangan sinusoidal bertujuan untuk mendapatkan nilai rugi Fe (P_{Fe}) pada sumber AC tiga fasa. Impelementasi model untuk uji tersebut dalam

Matlab Simulink pada Gambar 2(a). Blok pengukuran tegangan masukan, arus masukan, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya terdapat pada

Gambar 2(b). Untuk mengubah-ubah nilai tegangan masukan sumber dilakukan melalui kotak dialog dengan mengklik ganda U_a , U_b , atau U_c .



(a)



(b)

Gambar 2. (a) Blok utama simulasi uji motor induksi tanpa beban dengan sumber tegangan sinusoidal; (b) Blok simulasi pengukuran tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, dan faktor daya.

4.2 Pencocokan kurva

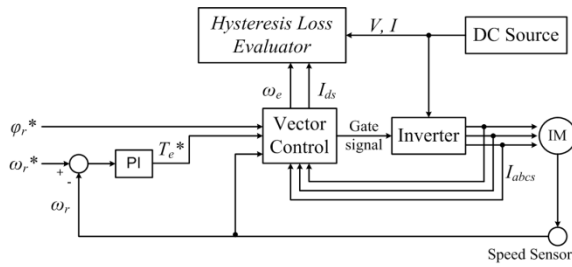
Aplikasi pencocokan kurva (*curve fitting*) adalah salah satu aplikasi (*apps*) bawaan perangkat lunak Matlab yang digunakan untuk menentukan nilai koefisien rugi *eddy-current* (K_e) maupun koefisien rugi histeresis (K_h) menggunakan data-data hasil simulasi yang diperoleh sebelumnya.

4.3 Simulasi penentuan rugi histeresis pada motor induksi yang dikemudikan dengan *vector control*

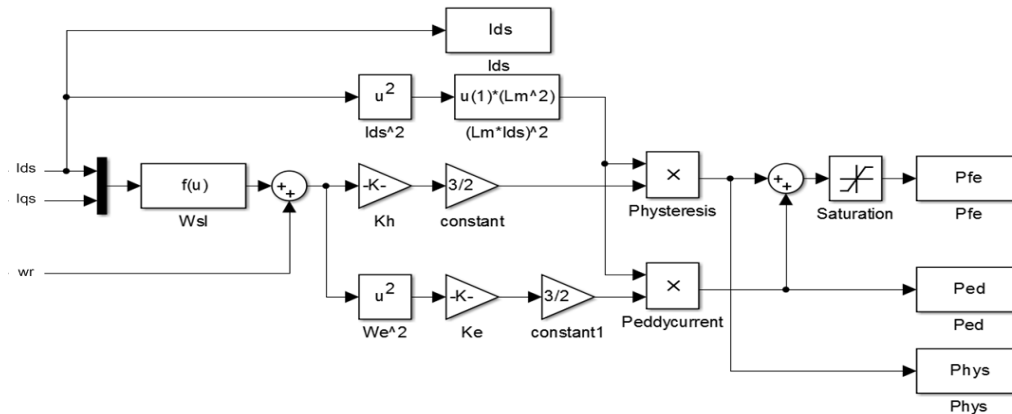
Desain sistem evaluasi yang dikembangkan dalam penelitian ini dijabarkan pada Gambar 3 yang terdiri dari unit motor induksi yang dikemudikan dengan *vector control* dan dilengkapi dengan blok *Hysteresis*

Loss Evaluator (HLE). Masukan tegangan (V) dan arus (I) dari sumber DC digunakan oleh HLE untuk menentukan daya masukan (P_{in}). Sedangkan parameter-parameter masukan dari motor induksi dan *vector control* digunakan untuk menghitung rugi histeresis.

Sedangkan implementasi HLE ditunjukkan pada Gambar 4 yang diletakkan di bawah *submask* blok *Vector Control*.



Gambar 3. Diagram blok motor induksi dengan *vector control*.



Gambar 4. Implementasi *Hysteresis Loss Evaluator* pada Simulink.

5. Hasil dan Analisis

5.1 Hasil Simulasi Uji Motor Induksi Tanpa Beban Sumber Tegangan Sinusoidal pada Frekuensi 50 Hz

Simulasi uji motor induksi tanpa beban sumber tegangan sinusoidal dengan variasi tegangan sumber bertujuan untuk mendapatkan koefisien rugi histeresis (K_h) dan koefisien rugi eddy-current (K_e). Data-data berupa: tegangan stator per fasa tanpa beban (V_{NL}), arus stator per fasa dalam keadaan tanpa beban (I_{NL}), daya tiga tanpa beban (P_{in}), faktor daya ($\cos \phi$), dan putaran rotor (ω). Hasil simulasi tersebut tertera pada Tabel II.

TABEL II. HASIL SIMULASI UJI MOTOR INDUKSI TANPA BEBAN SUMBER TEGANGAN SINUSOIDAL PADA FREKUENSI 50 HZ.

No	V_{NL} (V)	I_{NL} (A)	P_{in} (W)	$\cos \phi$	ω (RPM)
1	30,00	0,40	20,45	0,57	731
2	40,00	0,48	21,73	0,38	739
3	50,00	0,59	23,69	0,27	743
4	60,00	0,69	25,76	0,21	745
5	70,00	0,81	28,71	0,17	746
6	80,00	0,93	31,87	0,14	747
7	90,00	1,04	35,47	0,13	748
8	100,00	1,15	39,49	0,11	748
9	110,00	1,27	44,06	0,11	748
10	120,00	1,39	47,70	0,09	749

Menurut [9] rugi-rugi pada stator terdiri dari rugi besi (P_{Fe}), rugi tembaga (P_{Cu}), dan rugi gesekan (P_{fw}):

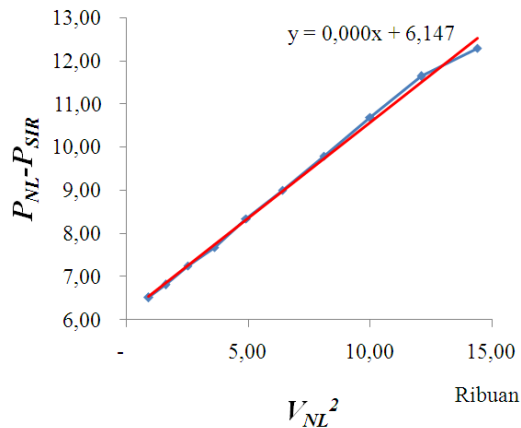
$$P_{nl} = P_{Fe} + P_{Cu} + P_{fw}$$

Rugi gesekan (P_{fw}) diperoleh dengan melakukan plotting grafik $P_{NL} - P_{Cu}$ sebagai fungsi dari kuadrat V_{NL} . Kemudian melakukan regresi linier terhadap kurva hingga didapat persamaan garis lurus $y = mx + b$. Sehingga nilai P_{fw} sama dengan nilai b dari persamaan garis lurus hasil regresi linier tersebut. Dari Gambar 5 diperoleh P_{fw} sebesar 6,15 W.

TABEL III. HASIL PERHITUNGAN RUGI-RUGI PADA STATOR.

No	V_{NL}^2	P_{NL} (W)	P_{Cu} (W)	$P_{NL}-P_{Cu}$	P_{Fe} (W)
1	900,00	6,82	0,30	6,52	0,37
2	1600,00	7,24	0,43	6,81	0,66
3	2500,00	7,90	0,65	7,25	1,10
4	3600,00	8,59	0,90	7,68	1,53
5	4900,00	9,57	1,23	8,34	2,19
6	6400,00	10,62	1,62	9,00	2,85
7	8100,00	11,82	2,03	9,79	3,64
8	10000,00	13,16	2,47	10,70	4,55
9	12100,00	14,69	3,04	11,64	5,49
10	14400,00	15,90	3,61	12,29	6,14

Setelah P_{Cu} dan P_{fw} diperoleh, maka P_{Fe} dapat dihitung dan hasilnya tercantum pada Tabel III. Selanjutnya separasi komponen rugi-rugi Fe menjadi rugi histeresis, rugi eddy-current, dan rugi tambahan mengacu kepada Persamaan (10) dengan membuat grafik yang mendeskripsikan rugi-rugi Fe (P_{Fe}) versus kuat arus magnetisasi (I_m). kuat arus magnetisasi, I_m , diperoleh dari perhitungan menggunakan Persamaan (9). Hasil perhitungan I_m tercantum pada Tabel IV.

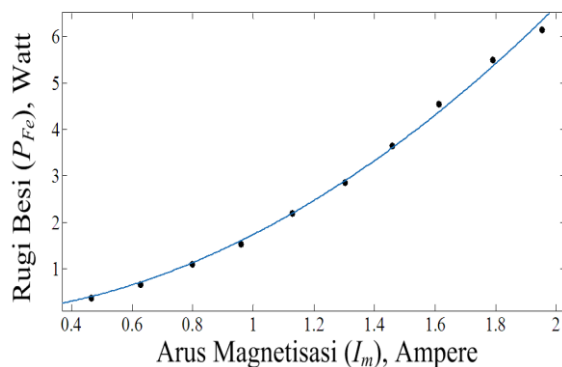


Gambar 5. Regresi linier untuk menentukan P_{fw} pada frekuensi sumber 50 Hz.

TABEL IV. HASIL PERHITUNGAN ARUS MAGNETISASI.

No	I_{NL} (A)	$\cos \phi$	$\sin \phi$	I_m (A)
1	0,40	0,57	0,82	0,46
2	0,48	0,38	0,92	0,63
3	0,59	0,27	0,96	0,80
4	0,69	0,21	0,98	0,96
5	0,81	0,17	0,99	1,13
6	0,93	0,14	0,99	1,30
7	1,04	0,13	0,99	1,46
8	1,15	0,11	0,99	1,61
9	1,27	0,11	0,99	1,79
10	1,39	0,09	1,00	1,95

Plotting dan pencocokan kurva menggunakan aplikasi Matlab yang hasilnya adalah seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Plotting P_{Fe} sebagai fungsi I_m dan pencocokan kurvanya.

Diperoleh hasil pencocokan kurva dengan hasil terbaik saat α (pangkat dari suku rugi histeresis) bernilai 2 seperti pada Gambar 7. Nilai koefisien-koefisien a, b, dan c yang diperoleh dari pencocokan kurva pada Gambar 7 digunakan untuk menghitung koefisien-koefisien rugi histeresis, rugi eddy-current, dan rugi lain-lain. Perhitungan koefisien rugi histeresis:

$$a = K_h f \zeta^2$$

$$K_h = 1,57 \times 10^{-2} / \zeta^2$$

Perhitungan koefisien rugi eddy-current:

$$b = K_e f^2 \zeta^2$$

$$K_e = 2,78 \times 10^{-4} / \zeta^2$$

Perhitungan koefisien rugi lain-lain:

$$c = K_{ex} f^{1,5} \zeta^{1,5}$$

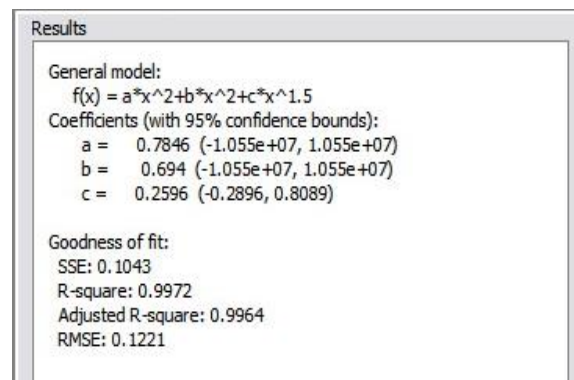
$$K_{ex} = 7,34 \times 10^{-4} / \zeta^{1,5}$$

5.2 Hasil simulasi *Hysteresis Loss Evaluator* (HLE) pada motor induksi dengan *vector control*

Simulasi ini dilakukan dengan aplikasi Matlab menggunakan model blok pengendalian motor induksi dengan *vector control*. Torsi beban referensi diatur pada nilai nol sedangkan kecepatan referensi 700 RPM (setengah dari kecepatan nominal). Hasil keluaran ditampilkan pada Gambar 8.

Grafik pada Gambar 8 tersebut menunjukkan besarnya rugi besi P_{Fe} dipengaruhi oleh arus *direct stator* I_{ds} sebagaimana diformulasikan Persamaan (4). Nilai rugi besi P_{Fe} berkisar antara $2,55 \times 10^{-8}$ hingga $1,09 \times 10^3$ Watt. Sedangkan nilai rugi histeresis P_h berkisar antara $2,07 \times 10^{-8}$ hingga $5,15 \times 10^2$ Watt. Rasio rugi histeresis P_h terhadap rugi besi P_{Fe} berada pada rentang 47,09 % hingga 81,18 %. Skema pengendalian *vector control* yang digunakan pada simulasi ini masih merupakan teknik standar dimana model motor induksi yang digunakan belum memasukkan faktor rugi-rugi besi ke dalam pemodelannya.

Besarnya rugi histeresis yang muncul pada simulasi tersebut dipengaruhi oleh faktor besarnya arus magnetisasi inti stator, yang pada skema *vector control* dipengaruhi oleh arus *direct stator* I_{ds} . Secara fisis fenomena tersebut terjadi karena dibutuhkan daya untuk menghasilkan torsi yang cukup untuk mengatasi inersia (kelembaman) rotor dari kondisi diam hingga berputar pada kecepatan referensi yang ditentukan.



Gambar 7. Hasil pencocokan kurva P_{Fe} sebagai fungsi I_m .

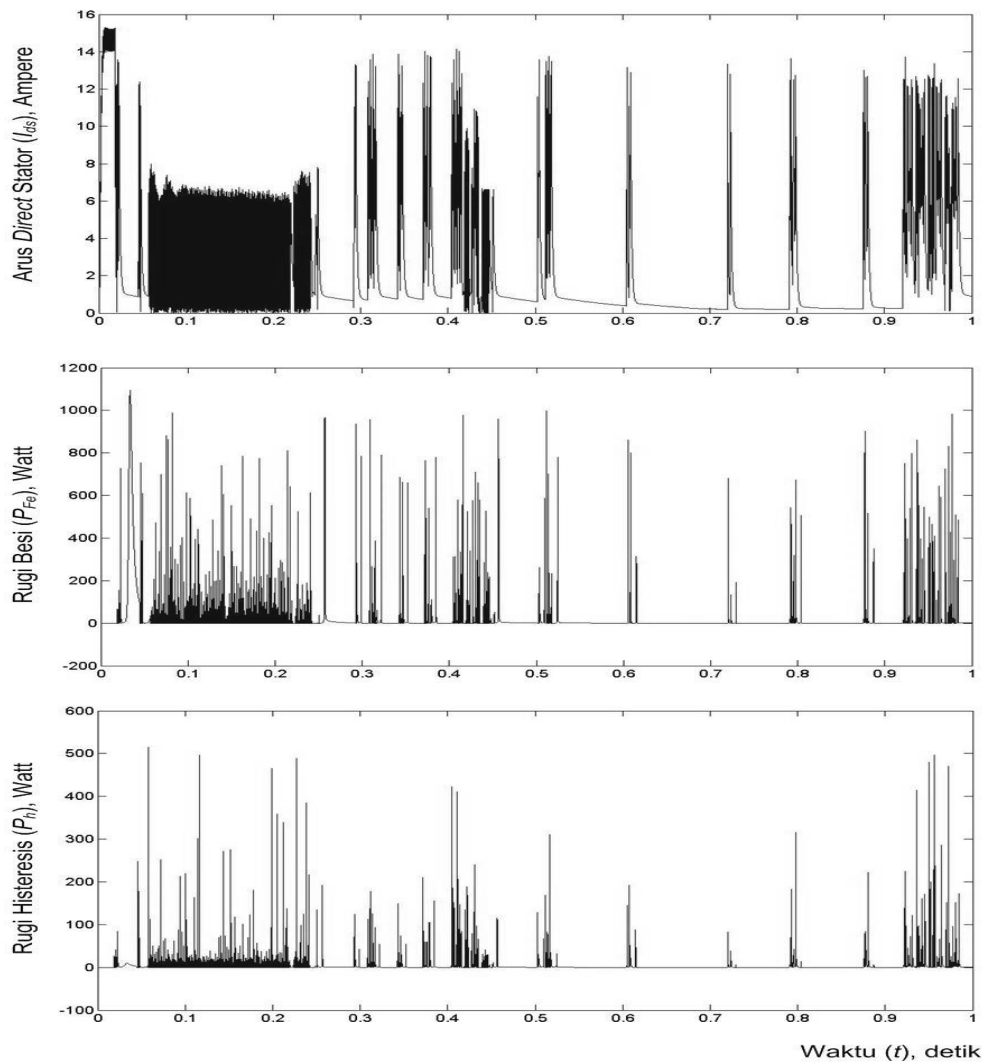
Hasil yang diperoleh dari riset ini melengkapi hasil yang diperoleh dari riset yang dilakukan oleh [11] yang menggunakan jenis motor induksi yang sama

sebagai bahan uji. Adapun pada riset yang dilakukan oleh [11] hasil simulasinya berupa plot kurva B-H seperti yang terlihat pada Gambar 9 yang luasannya merupakan nilai rugi histeresis [12]. Sedangkan hasil yang diperoleh dari riset ini berupa kuantitas numerik.

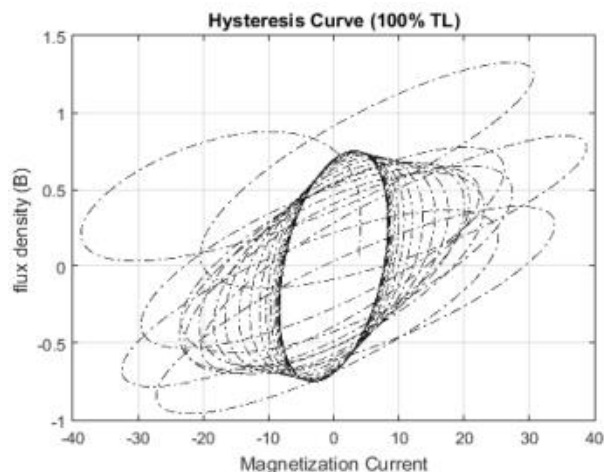
6. Simpulan

Pada simulasi sistem kendali penggerak motor induksi tiga fasa berbasis *vector control* tanpa memasukkan faktor rugi-rugi besi dalam pemodelannya menunjukkan besarnya nilai rugi-rugi

besi tersebut. Sedangkan pada kecepatan rendah, rugi histeresis sebagai salah satu komponen dari rugi-rugi Fe merupakan faktor dominan yang menyebabkan rugi-rugi pada motor induksi. Daya yang muncul sebagai rugi histeresis digunakan untuk memberikan torsi yang menggerakkan rotor dari kondisi diam hingga berputar pada kecepatan referensi yang ditetapkan. Dari hasil simulasi diperoleh nilai rugi besi P_{Fe} berkisar antara $2,55 \times 10^{-8}$ hingga $1,09 \times 10^3$ Watt. Sedangkan nilai rugi histeresis P_h berkisar antara $2,07 \times 10^{-8}$ hingga $5,15 \times 10^2$ Watt. Rasio rugi histeresis P_h terhadap rugi besi P_{Fe} berada pada rentang 47,09 % hingga 81,18 %.



Gambar 8. Hasil simulasi *Hysteresis Loss Evaluator* (HLE).



Gambar 9. Kurva rugi histeresis hasil riset [11].

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Tim INTEGRASI atas segala koreksi dan masukan kepada tim penulis hingga diterbitkannya karya tulis ini. Serta kepada rekan-rekan mahasiswa dan para laboran di Laboratorium Mesin Listrik dan Kontrol, Program Pasca Sarjana Terapan, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS).

Daftar Pustaka

- [1] S. Thomas dan R.A. Koshy, "Efficiency analysis of indirect vector controlled three phase induction motor drive", *IJAREEIE*, Vol. 2, Issue 8, pp. 3805 – 3812, August 2013.
- [2] J.G.W. West, "DC, induction, reluctance and pm motors for electric vehicles", *IEEE Trans on. Power Engineering Journal*, Volume 8, Issue 2, pp. 77 – 88, April, 1994.
- [3] K.R. Kumar, D. Sakthibala, dan S. Palaniswami, "Efficiency optimization of induction motor drive using soft computing techniques", *International Journal of Computing Applications* (0975 – 8887), Vol. 3, No. 1, June, 2010.
- [4] E.S. Abdin, G.A. Ghoneem, H.M.M. Diab, dan S.A. Deraz, "Efficiency optimization of a vector controlled induction motor drive using an artificial neural network", *Industrial Electronics Society*, 2003, IECON '03, The 29th Annual Conference of the IEEE, Vol. 3, pp. 2543 – 2548, 2003.
- [5] E. Dlala, A. Belahcen, dan A. Arkkio, "On the Importance of incorporating iron losses in the magnetic field solution of electrical machines", *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 46, No. 8, August, 2010.
- [6] D. M. Ionel, M. Popescu, S. J. Dellinger, T. J. E. Miller, R. J. Heideman, dan M. I. McGilp, "On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines", *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 42, No. 3, May/June, 2006.
- [7] S. Lim dan K. Nam, "Loss-minimising control scheme for induction motor", *IEEE Proceedings Electr. Power Appl.*, Vol. 151, No. 4, July, 2004.
- [8] L. Liu, W. N. Fu, S. Yang, dan S. L. Ho, "Iron loss separation in high frequency using numerical techniques", *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. 52, No. 3, March, 2016.
- [9] *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*, IEEE Std. 112, 2004.
- [10] Ramu Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, New Jersey, USA, 2001.
- [11] B. Praharsena, E. Purwanto, A. Jaya, M.R. Rusli, H. Toar, dan Ridwan, "Stator Flux Estimator Using Feed-Forward Neural Network for Evaluating Hysteresis Loss Curve in Three Phase Induction Motor", *EMITTER Int. Journal of Eng. Tech.*, Vol. 6, No. 1, June 2018.
- [12] P. C. Sen, *Principle of Electric Machines and Power Electronics*, John Wiley & Son, USA, 2013.