

ANALISIS RUGI-RUGI SISTEM PROPULSI PADA KERETA REL LISTRIK (KRL) (LOSS ANALYSIS OF PROPULSION SYSTEM ON AN ELECTRIC RAILWAY)

Sri Indah Lestari, Ir. Agus Jamal, M.Eng., Anna Nur Nazilah Chamim, S.T., M.Eng.

Faculty of Electrical Engineering Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jalan Lingkar Selatan, Tamantirto, Kasihan, Bantul, Yogyakarta 55183, Indonesia
Corresponding Email: sriindah95@gmail.com

Abstract

Electric Railway (KRL) is a train that is based on electrification system. The electrification system in the KRL supplies electrical energy to the train locomotive and several other carriage units, so the train can run. Electrical energy can be either AC or DC source. There are two electrical systems to support the performance of KRL, propulsion system and auxiliary system. The propulsion system is a driving system and the auxiliary system is the system that handles the electrical load on KRL.

In this research, discuss about the loss of propulsion system on KRL LAA Electric DC, AC Traction Motor. The propulsion system consists of several components, such as pantograph, circuit breaker, capacitor filter, IGBT VVVF inverters and AC traction motors. The component has different losses and different efficiencies.

There are five test conditions for AC traction voltage inputs of 160.5V, 321V, 493.9V, 635V and 645V. By calculating using equations, from the five test conditions it can be seen that the propulsion system has the lowest power loss with the highest efficiency at the input voltage of AC 635V traction motors, which obtained the power loss of inverter VVVF IGBT 41.996kW with the efficiency 90.67% and the power loss of AC traction motor 18.219kW with the efficiency 91.45%.

Keywords: *propulsion system, loss, pantograph, circuit breaker, capacitor filter, IGBT inverter VVVF, AC traction motor.*

1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kereta api merupakan transportasi darat yang berjalan disepanjang lintasan rel, terdiri dari lokomotif dan beberapa rangkaian gerbong yang luas sehingga dapat mengangkut penumpang dan barang dalam skala yang besar. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) pada bulan Desember 2016 jumlah penumpang kereta api tercatat 32,2 juta atau meningkat sebesar 8,29% dan jumlah barang yang diangkut tercatat 3,3 juta ton atau naik sebesar 4,38% dibandingkan dengan bulan Nopember 2016.

Melihat semakin meningkatnya jumlah penumpang kereta api serta mendesaknya kebutuhan transportasi yang efisien maka efisiensi pada KRL harus diperhatikan agar terciptanya

sistem kerja yang maksimal terkhusus pada sistem *propulsi* KRL yang berperan sebagai penggerak KRL. Untuk menunjang unjuk kerja sistem *propulsi* tersebut dibutuhkan beberapa komponen listrik yaitu *inverter VVVF IGBT* dan motor traksi sebagai penggerak. Kedua komponen tersebut memiliki efisiensi yang berbeda-beda.

Seperti halnya sistem kelistrikan, dari sumber pembangkit sampai ke beban yang terdapat rugi-rugi daya, maka pada KRL dari sumber masukkan hingga ke sistem *propulsi* juga terdapat rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya tersebut harus ditekan seminimal mungkin guna meningkatkan efisiensi unjuk kerja sistem *propulsi* KRL. Oleh karena itu, untuk mengetahui efisiensi unjuk kerja sistem *propulsi* KRL, besarnya rugi-rugi daya setiap komponen sistem *propulsi* perlu diperhitungkan.

Penelitian “**Analisis Rugi-rugi Sistem Propulsi pada Kereta Rel Listrik (KRL)**”

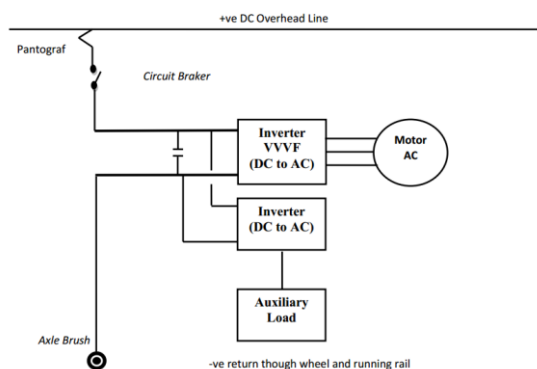
disusun untuk mengetahui besarnya rugi-rugi daya di setiap komponen sistem propulsi dengan menggunakan motor traksi AC 200kW. pada penelitian ini menggunakan metode perhitungan dengan persamaan dan terdapat lima kondisi motor AC yang telah dilakukan pengukuran secara langsung oleh pihak perusahaan.

2 DASAR TEORI

2.1 Sistem Propulsi KRL

Sistem *propulsi* merupakan sistem penggerak dengan menggunakan motor traksi baik AC maupun DC yang berfungsi sebagai penggerak KRL. Beberapa komponen penyusun sistem *propulsi* pada KRL diantaranya:

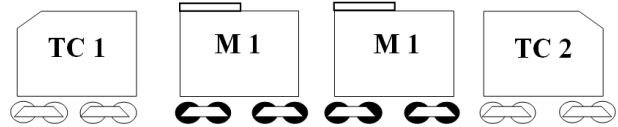
- Pantograf sebagai penyalur aliran listrik dari LAA ke KRL,
- Circuit Breaker* (CB) sebagai pemutus aliran listrik apabila terjadi kesalahan atau gangguan,
- Kapasitor berfungsi sebagai penyimpan energi didalam medan elektrik dengan mengumpulkan ketidakseimbangan energi didalam medan elektrik, serta sebagai *filter* guna memperhalus gelombang tegangan keluaran,
- Inverter* VVVF IGBT sebagai pengubah listrik DC satu fasa menjadi listrik AC tiga fasa, serta sebagai kontrol kecepatan motor dengan memvariasikan tegangan input dan frekuensi motor. Tegangan *output inverter* bervariasi, sedangkan tegangan *input inverter* bersifat konstan,
- Motor traksi AC sebagai penggerak, suplai tegangan tiga fasa diperoleh dari *inverter* VVVF IGBT.



Gambar 1. Skematik sistem propulsi KRL

Satu set KRL terdapat empat gerbong yaitu gerbong TC1, M1, M2 dan TC2. TC (*Trailer Cabin*) merupakan gerbong tanpa mesin penggerak, sementara M (motor) merupakan gerbong dengan mesin penggerak dan dilengkapi dengan pantograf. Pantograf terletak di atap gerbong M1 dan M2 yang

dirangkai secara paralel. Rangkaian set KRL terbagi menjadi dua unit, unit pertama terdiri dari TC1 dan M1 sedangkan unit kedua terdiri dari TC2 dan M2. Berikut ini merupakan rangkaian satu set KRL;



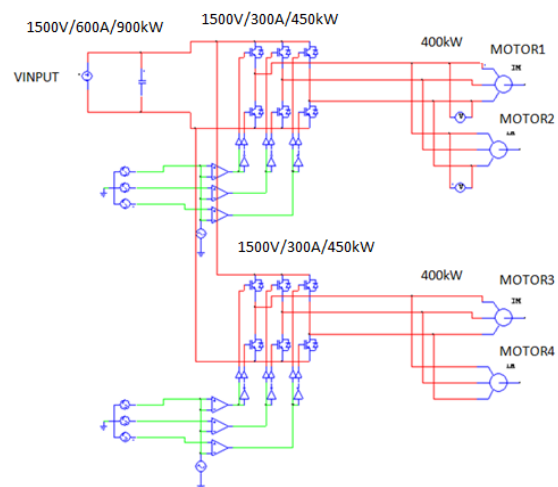
Gambar 2. Rangkaian satu set KRL

Berikut ini merupakan spesifikasi dari satu set KRL diatas;

Tabel 1. Spesifikasi KRL

Nama Komponen	Spesifikasi
Tegangan input	1500VDC
Arus input	1200 A
Daya input	1800 kW
Type IGBT	3300V/1500A
Kapasitor	4 mF
Motor traksi AC	200 kW
Kecepatan	100km/h

Dari rangkaian satu set KRL diatas, berikut ini merupakan skematik kelistrikan sistem propulsi KRL;



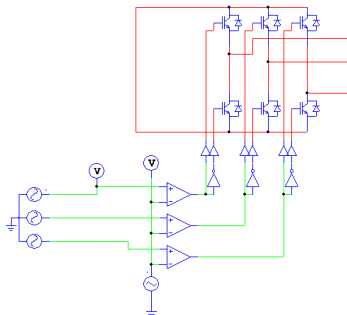
Gambar 3. Skematik sistem propulsi KRL

2.2 Inverter VVVF IGBT

Inverter VVVF IGBT terdiri dari enam buah saklar atau switch IGBT yang dipasang sejajar. Didalam IGBT tersebut terdapat dioda yang masing-masing terpasang secara paralel antara dioda satu dengan yang lainnya. IGBT dikendalikan oleh PWM, dimana satu PWM dapat mengendalikan dua buah IGBT. IGBT merupakan semikonduktor aktif yang menjadi komponen utama pada inverter.

Inverter VVVF IGBT berfungsi sebagai pengubah tegangan DC satu fasa menjadi AC tiga fasa dan sebagai kontrol kecepatan motor traksi AC dengan mengubah nilai tegangan dan frekuensi pada inverter agar menghasilkan tegangan output dan frekuensi sesuai dengan keinginan.

Ketika tegangan referensi lebih kecil dari tegangan carrier, maka tegangan output yang dihasilkan inverter akan kecil. Begitu pula sebaliknya, apabila tegangan referensi lebih besar dari tegangan carrier, maka tegangan output yang dihasilkan akan lebih besar.



Gambar 4. Inverter VVVF IGBT

Pada IGBT, terdapat dua macam rugi-rugi yaitu rugi-rugi konduksi dan rugi-rugi pensaklaran atau rugi-rugi switching.

$$P_{cond} = n \times V_{CESAT} \times I_C \times D$$

Dimana: n = Banyaknya IGBT yang digunakan
 V_{CESAT} = Tegangan satu rasi CE (Volt)
 I_C = Arus collector (Ampere)
 D = Duty cycle

$$P_{sw} = n \times \frac{(E_{on} + E_{off}) \times I_{pk} \times f_{sw} \times V_{dc}}{\pi \times I_{nom} \times V_{nom}}$$

Dimana: P_{sw} = Rugi switching (Watt)

n = Banyaknya IGBT yang digunakan

E_{on} = Daya on (Watt)

E_{off} = Daya off (Watt)

I_{pk} = Arus puncak (Ampere)

f_{sw} = Frekuensi switching (Hz)

V_{dc} = Tegangan DC (Volt)

I_{nom} = Arus nominal (Ampere)

V_{nom} = Tegangan nominal (Volt)

Untuk dioda terdapat dua rugi-rugi yaitu rugi-rugi konduktansi dan rugi-rugi reverse recovery.

$$P_{cond} = V_F \times I_F$$

Dimana: P_{cond} = Rugi konduksi (Watt)

V_F = Tegangan forward (Volt)

I_F = Arus forward (Ampere)

$$P_{rec.dioda} = \frac{E_{rec} \times I_{pk} \times f_{sw} \times V_{dc}}{\pi \times I_{nom} \times V_{nom}}$$

Dimana: $P_{rec.dioda}$ = Rugi reverse recovery (Watt)

E_{rec} = Daya recovery (Watt)

I_{pk} = Arus puncak (Ampere)

f_{sw} = Frekuensi switching (Hz)

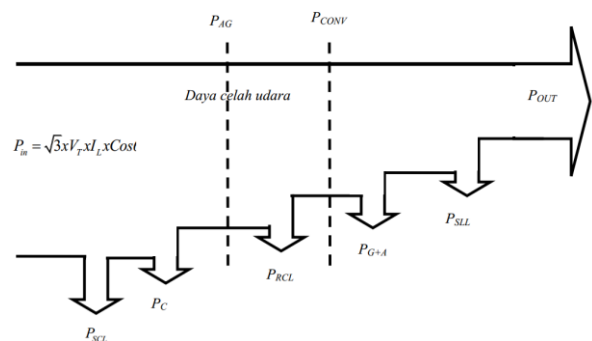
V_{dc} = Tegangan DC (Volt)

I_{nom} = Arus nominal (Ampere)

V_{nom} = Tegangan nominal (Volt)

2.3 Motor Traksi AC

Motor traksi AC tiga fasa merupakan komponen pokok yang terdapat pada sistem propulsi pada KRL, yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan prinsip induksi. Untuk sistem kerjanya, motor ini dikendalikan oleh inverter VVVF IGBT dengan mengubah tegangan dan frekuensi input pada motor traksi.



Gambar 5. Aliran daya motor traksi AC tiga fasa

2.3.1 Daya Input (P_{in})

Sesuai dengan namanya yaitu motor induksi, maka untuk mengalirkan suatu tegangan dan arus ke motor maka dibutuhkan suatu perantara yaitu berupa celah udara. Besarnya daya input ke kumparan stator motor induksi dirumuskan dengan:

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_T \times I_L \times \cos\theta$$

Dimana: P_{in} = Daya input motor (Watt)
 V_T = Tegangan sumber (Volt)
 I_L = Arus sumber (Ampere)
 $\cos\theta$ = Faktor daya motor induksi

2.3.2 Daya Celah Angin

Hasil pengurangan dari daya input dikurangi rugi-rugi daya pada stator maka akan diketahui besarnya daya masuk pada rotor yang berupa daya celah udara. Dimana rugi-rugi stator terdiri dari rugi tembaga stator (P_{SCL}) dan rugi inti stator (P_{CU}), untuk mencari keduanya digunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1$$

$$P_{CORE} = \frac{3 \cdot E_1^2}{R_c}$$

Dimana : I_1 = Arus stator (Ampere)
 R_1 = Resistansi stator (Ohm)
 R_c = Resistansi inti (Ohm)
 E_1 = Tegangan induksi stator (Ohm)

2.3.3 Daya Mekanik

Hasil pengurangan dari daya celah udara (P_{AG}) dikurangi dengan rugi tembaga pada rotor (P_{RCL}) menghasilkan besarnya daya mekanik (P_{CONV}). Besarnya P_{RCL} dapat dicari dengan persamaan berikut ini;

$$P_{RCL} = (P_{in} - P_{SCL} - P_{CORE}) \times s$$

Dimana: s = slip

2.3.4 Rugi Angin dan Gesekan

Gaya gesek yang terjadi pada *bearing* dan kipas pendingin motor induksi akan menimbulkan gaya gesek, dimana gaya gesek ini dapat mengakibatkan adanya rugi angin dan gesekan pada motor induksi. Besarnya rugi angin dan gesekan ini bernilai linier karena tidak berasal dari sisi kelistrikan motor induksi. Menurut S. Cornio E Romero, besarnya rugi angin dan gesekan ini

konstan antara 5-15% dari rugi-rugi total suatu motor induksi.

2.3.5 Rugi-rugi lain (P_{STRAY})

Besarnya P_{STRAY} tidak memiliki persamaan elektrik, karena pada dasarnya P_{STRAY} berasal dari rugi-rugi yang bersifat mekanis dan pengukurannya sangat sulit dilakukan, seperti rugi angin dan gesekan dan rugi lain-lain. Besarnya P_{STRAY} dapat dilihat pada tabel standar rugi-rugi yang telah ditetapkan oleh IEEE std 112 metode E1, dimana besarnya P_{STRAY} tergantung dari rating motor yaitu jumlah putaran dan daya motor.

Tabel 2. Rugi-rugi stray

Rating Mesin		Presentase Rugi Stray terhadap Daya Keluaran
1-125 hp	1-90 kW	1.8%
126-500 hp	91-375 kW	1.5%
501-2499 hp	376-1850 kW	1.2%
2500 hp keatas	851 keatas	0.9%

2.3.6 Daya Output (P_{OUT})

Hasil pengurangan antara daya mekanik (P_{CONV}) dikurangi rugi angin dan gesekan (P_{A+F}) akan menghasilkan besarnya daya *output* pada motor.

$$P_{out} = P_{CONV} - P_{A+W}$$

2.3.7 Efisiensi

Perbandingan antara daya output dengan daya *input* disebut dengan efisiensi dan biasanya dinyatakan dalam bentuk persen.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

3 METODOLGI

Pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode perhitungan dengan persamaan seperti diatas, dimana penulis tidak memasukkan besarnya rugi-rugi pantograf, CB dan *filter* kapasitor karena rugi-rugi dari ketiga komponen tersebut merupakan rugi-rugi mekanik.

Perhitungan dengan persamaan tersebut mengacu pada parameter hasil pengujian lima kondisi pengujian motor traksi AC oleh pihak

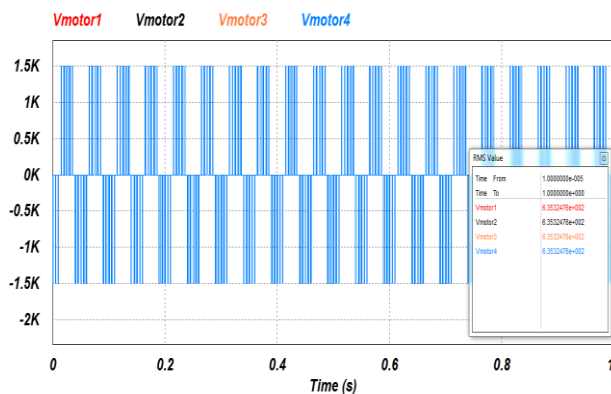
perusahaan. Besarnya tegangan pada pengujian tersebut ialah 160,5V, 321V, 493,9V, 635V dan 645V. Pada paper ini akan dipaparkan contoh perhitungan pada tegangan 635V, dimana pada pengujian 635V, sistem propulsi memiliki rugi-rugi terkecil dengan efisiensi paling besar.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Rugi-rugi IGBT

Pada IGBT, terdapat dua macam rugi-rugi yaitu rugi-rugi konduksi dan rugi-rugi pensaklaran atau rugi-rugi *switching*. Rugi-rugi konduksi disebabkan oleh adanya tegangan jatuh pada IGBT, dimana tegangan tersebut dipengaruhi oleh arus, sehingga rugi-rugi konduksi merupakan perkalian antara tegangan *on* dengan arus yang mengalir. Tegangan *on* merupakan tegangan satu rasi *collector-emitor* sedangkan arus yang mengalir ialah arus *collector*. Untuk penggunaan kontrol PWM maka besarnya rugi konduksi dapat dicari dengan mengalikan antara *collector* satu rasi, arus *collector* dan *duty cycle* (D).

Berikut ini merupakan bentuk gelombang keluaran dari inverter VVVF IGBT, Untuk menghasilkan tegangan *output* AC 235 V, amplitudo sinyal referensi sebesar 0.8222V dengan frekuensi 20 Hz. Sedangkan amplitudo sinyal *carrier* sebesar 4 Vpp dengan frekuensi 200 Hz. Masing-masing fasa pada sinyal referensi berbeda 120°.



Gambar 6. Hasil gelombang *output* inverter VVVF IGBT

Berikut ini merupakan perhitungan rugi-rugi inverter dengan parameter sebagai berikut;

Tabel 3. Parameter perhitungan rugi-rugi *switching* dan konduksi pada tegangan 635V

Daerah Kerja	Nilai
V_r	0,793
V_c	4
E_{on}	225W
E_{off}	150W
f_{sw}	200Hz
V_{CESAT}	3,25V
I_C	1500A
V_{dc}	1500V
I_{nom}	1500A
V_{nom}	3300V

Inverter VVVF IGBT terdiri dari enam buah IGBT, sehingga besarnya rugi konduktansi dan *switching* di kali kan dengan jumlah IGBT yang digunakan.

a. Perhitungan *Duty Cycle*

$$D = \frac{V_r}{V_c}$$

$$D = \frac{0,793}{4}$$

$$D = 0,198$$

b. Rugi konduksi

$$P_{cond} = 6 \times V_{CESAT} \times I_C \times D$$

$$P_{cond} = 6 \times 3,25V \times 1500A \times 0,198$$

$$P_{cond} = 5,792kW$$

c. Arus puncak (I_{pk})

$$I_{pk} = \frac{\left(\frac{P_{in}}{V_{out}}\right)}{3}$$

$$I_{pk} = \frac{\left(\frac{450kW}{635V}\right)}{3}$$

$$I_{pk} = 236,220A$$

d. Rugi switching

$$P_{sw} = 6 \times \frac{(E_{on} + E_{off}) \times I_{pk} \times f_{sw} \times V_{dc}}{\pi \times I_{nom} \times V_{nom}}$$

$$P_{sw} = 6 \times \frac{(225 + 150) \times 236,220 \text{A} \times 200 \times 1500}{\pi \times 1500 \times 3300}$$

$$P_{sw} = 6 \times 1,709 \text{W}$$

$$P_{sw} = 10,254 \text{kW}$$

e. Rugi-rugi total

$$P_{total} = P_{cond} + P_{sw}$$

$$P_{total} = 5,792 \text{kW} + 10,254 \text{kW}$$

$$P_{total} = 16,046 \text{kW}$$

4.2 Rugi-rugi dioda

Pada dioda terdapat dua rugi-rugi yaitu rugi konduksi dan rugi *reverse recovery*. Dioda merupakan perangkat P-N *junction* dua terminal yaitu anoda dan katoda yang memungkinkan arus masuk searah atau disebut dengan keadaan konduksi, dan keadaan pemblokiran arus yang terjadi ketika peralihan kondisi dioda *on* ke *off* atau yang disebut dengan *reverse*.

Tabel 4. Parameter perhitungan rugi-rugi dioda

Daerah kerja	Nilai
V_F	2.2V
I_F	1500A
V_{GE}	15V
R_G	1Ω

Rugi konduksi

$$P_{cond} = V_F \times I_F$$

$$P_{cond} = 2.2 \text{V} \times 1500 \text{A}$$

$$P_{cond} = 3,3 \text{kW}$$

Daya recovery reverse

$$E_{rec} = \frac{V_{GE}^2}{R_G}$$

$$E_{rec} = \frac{15^2}{1}$$

$$E_{rec} = 225 \text{W}$$

a. Rugi-rugi *recovery reverse*

Tabel 5. Parameter perhitungan rugi-rugi dioda

Daerah Kerja	Nilai
E_{rec}	225W
I_{pk}	236,220A
f_{sw}	200Hz
V_{dc}	1500V
I_{nom}	1500A
V_{nom}	3300V

$$P_{rec.dioda} = \frac{E_{rec} \times I_{pk} \times f_{sw} \times V_{dc}}{\pi \times I_{nom} \times V_{nom}}$$

$$P_{rec.dioda} = \frac{225 \text{W} \times 236,220 \text{A} \times 200 \text{Hz} \times 1500 \text{V}}{\pi \times 1500 \text{A} \times 3300 \text{V}}$$

$$P_{rec.dioda} = 1,025 \text{kW}$$

b. Rugi-rugi total

$$P_{tot} = P_{cond} + P_{rec.dioda}$$

$$P_{tot} = 6 \times (3,3 \text{kW} + 1,025 \text{kW})$$

$$P_{tot} = 25,95 \text{kW}$$

4.3 Rugi-rugi inverter VVVF IGBT

Rugi-rugi total inverter VVVF IGBT merupakan penjumlahan dari rugi-rugi yang terdapat pada IGBT ditambah dengan rugi-rugi yang terdapat pada diod. Berikut ini merupakan perhitungan dari besarnya rugi-rugi total pada inverter VVVF IGBT;

a. Rugi total

$$P_{tot} = P_{rugi.IGBT} + P_{rugi.DIODA}$$

$$P_{tot} = 16,046kW + 25,95kW$$

$$P_{tot} = 41,996kW$$

b. Daya output (P_{out})

$$P_{out} = P_{in} - P_{tot}$$

$$P_{out} = 450kW - 41,996kW$$

$$P_{out} = 408,004kW$$

c. Efisiensi

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{408,004kW}{450kW}$$

$$\eta = 90,67\%$$

4.4 Rugi-rugi motor traksi AC

Keuntungan dari penggunaan motor ini diantaranya yaitu bentuk sederhana dengan konstruksi yang cukup kuat, biaya murah, efisiensi tinggi, perawatan minimum dan tidak memerlukan peralatan khusus ketika dioperasikan.

Akan tetapi, dibalik keuntungannya motor traksi juga memiliki rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya tersebut terdapat pada rugi inti stator, rugi inti rotor, rugi angin dan gesekan, serta rugi lain-lain atau yang disebut dengan rugi *stray*. Setelah didapat besarnya rugi-rugi tentu akan diperoleh berapa besar efisiensi dari motor traksi tersebut.

Berikut ini merupakan perhitungan rugi-rugi ada motor traksi AC;

Tabel 6. Parameter kondisi pengujian motor IV

Daerah Kerja	Nilai	Daerah Kerja	Nilai
P_{out}	200 kW	P_{FW}	373,03 W
V	635 V	L_s	0,921 mH
f	36,38 Hz	L_R	0.422 mH
I_{in}	217,6 A	L_C	22,569 mH
I_{out}	68,9 A	R_s	0,04581 Ω
M	1800	R_R	0,04080 Ω
$\cos \theta$	0,89	R_C	365,442 Ω
η	93,97	P	4
N_R	1064		

a. Daya Input (P_{in})

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V_T \times I_L \times \cos \theta$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \times 635V \times 217,6A \times 0,89$$

$$P_{in} = 213kW$$

b. Rugi Tembaga Stator (P_{SCL})

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_{in}^2 \cdot R_1$$

$$P_{SCL} = 3 \cdot (217,6)^2 \cdot 0,04581$$

$$P_{SCL} = 6,5kW$$

c. Rugi Inti Stator (P_{CORE})

$$P_{CORE} = \frac{3 \cdot V_{in}^2}{R_C}$$

$$P_{CORE} = \frac{3 \cdot (635)^2}{365,442}$$

$$P_{CORE} = 3,3kW$$

d. Total Rugi Stator

$$P_{\text{rugi-stator}} = P_{SCL} + P_{CORE}$$

$$P_{\text{rugi-stator}} = 6,5kW + 3,3kW$$

$$P_{\text{rugi-stator}} = 9,8kW$$

e. Daya Input Rotor ($P_{in-rotor}$)

$$P_{in-rotor} = P_{in} - P_{\text{rugi-stator}}$$

$$P_{in-rotor} = 213kW - 9,8kW$$

$$P_{in-rotor} = 203,2kW$$

f. Rugi Tembaga Rotor (P_{RCL})

$$N_s = \frac{120f}{P} = \frac{120 \times 36.38}{4} = 1091,4$$

$$s = \frac{N_s - N_R}{N_s} = \frac{1091,4 - 1064}{1091,4} = 0,025$$

$$P_{RCL} = (P_{in} - P_{SCL} - P_{CORE}) \times s$$

$$P_{RCL} = (213kW - 6,5kW - 3,3kW) \times 0,025$$

$$P_{RCL} = 5,08kW$$

g. Daya Mekanik (P_m)

$$P_m = P_{in-rotor} - P_{RCL}$$

$$P_m = 203,2kW - 5,08kW$$

$$P_m = 198,12kW$$

h. Rugi Gesekan (P_W)

$$P_W = 0,373kW$$

i. Rugi Stray (P_{STRAY})

$$P_{STRAY} = 1,5\% \times (P_m - P_W)$$

$$P_{STRAY} = 1,5\% \times (198,12kW - 0,373kW)$$

$$P_{STRAY} = 1,5\% \times 197,747kW$$

$$P_{STRAY} = 2,966kW$$

j. Daya Output (P_{out})

$$P_{out} = P_m - P_W - P_{STRAY}$$

$$P_{out} = 198,12kW - 0,373kW - 2,966kW$$

$$P_{out} = 194,781kW$$

k. Efisiensi (η)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{194,781kW}{213kW} \times 100\%$$

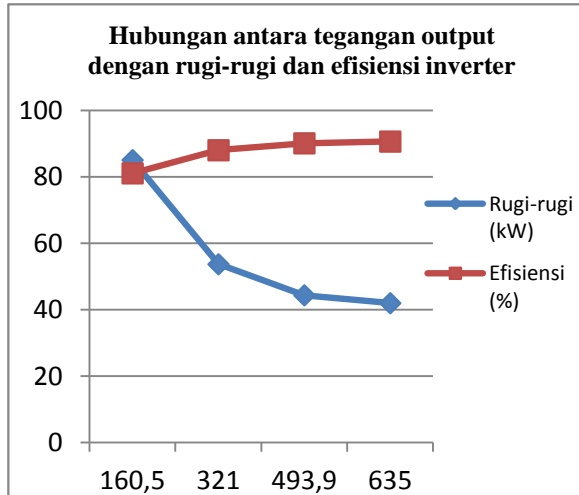
$$\eta = 91,45\%$$

4.5 Hasil rugi-rugi lima kondisi pengujian inverter VVVF IGBT

Tabel 7. Hasil perhitungan rugi-rugi inverter VVVF IGBT

Vout (V)	Prugi IGBT (kW)	Prugi Dioda (kW)	Prugi total (kW)	Efisiensi (%)
160,5	40,946	44,142	85,088	81,1
321	21,749	31,968	53,717	88,06
493	16,662	27,708	44,37	90,14
635	16,046	25,95	41,996	90,67
645	16,118	25,85	41,968	90,67

Dari tabel diatas, semakin besarnya nilai tegangan *output* maka efisiensi yang diperoleh akan semakin besar. Hal tersebut dikarenakan, apabila besarnya tegangan yang mengalir kecil maka arus yang mengalir besar. Kemudian untuk mencari nilai daya, pada persamaam $P=I^2R$ besarnya arus yang mengalir dikuadratkan. Berikut merupakan grafik hubungan antara tegangan output dengan rugi-rugi dan efisiensi *inverter* VVVF IGBT



Gambar 7. Grafik hubungan antara tegangan output, rugi-rugi dan efisiensi inverter VVVF IGBT

4.6 Hasil rugi-rugi lima kondisi pengujian motor traksi AC

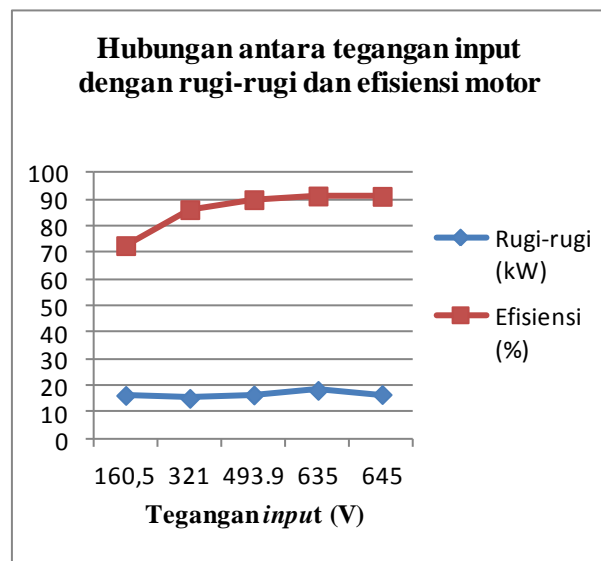
Berikut ini merupakan hasil perhitungan besarnya rugi-rugi daya pada motor traksi dengan lima kondisi pengujian motor traksi yang terdapat pada data spesifikasi motor traksi, dimana besarnya tegangan input dan frekuensi berbeda-beda. Dengan besarnya tegangan input dan frekuensi yang berbeda, dapat diperoleh hasil yang berbeda.

Tabel 8. Hasil perhitungan rugi-rugi motor traksi AC pada lima kondisi pengujian

V	Pin (kW)	Prugi (kW)	Pout (kW)	Efisiensi (%)
160,5	59,893	16,323	43,570	72,75
321	111,04	15,215	95,825	86,30
493.9	165,9	16,493	149,407	90,06
635	213	18,219	194,781	91,45
645	191,744	16,645	175,099	91,32

Dari tabel diatas, dapat diketahui bahwa semakin besar nilai tegangan *input* pada motor traksi maka efisiensi yang diperoleh semakin besar. Hal tersebut dapat terjadi karena, ketika tegangan yang mengalir semakin besar maka arus yang mengalir akan semakin kecil. Sementara, dilihat dari persamaan bahwa besarnya daya merupakan hasil kali antara arus kuadrat dikali dengan hambatan atau $P=I^2R$, sehingga ketika arus yang mengalir kecil arus yang diperoleh kecil serta nilai daya pun kecil.

Berikut ini merupakan grafik hubungan antara tegangan *input* motor dengan rugi-rugi dan efisiensi pada motor;



Gambar 8. Grafik hubungan antara tegangan output, rugi-rugi dan efisiensi pada motor traksi AC

5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari lima kondisi pengujian sistem propulsi pada KRL dapat diketahui bahwa rugi-rugi terkecil dengan efisiensi terbesar terdapat pada kondisi pengujian IV.

2. Berikut ini merupakan besarnya rugi-rugi dan efisiensi sistem *propulsi* pada KRL pada kondisi pengujian IV:

Tabel 9. Rugi-rugi dan efisiensi sistem *propulsi* pada KRL kondisi pengujian IV

Nama komponen	Rugi-rugi (kW)	Efisiensi (%)
Inverter VVVF IGBT	41,996	90,67
Motor traksi AC	18,219	91,45

5.2 Saran

Berikut ini merupakan beberapa saran untuk penelitian berikutnya:

1. Sebaiknya dilakukan penelitian yang lebih mendalam lagi terkait dengan rugi-rugi pada pantograf, karena rugi-rugi pada pantograf sangat mempengaruhi sistem kerja sistem *propulsi*, dimana sumber listrik pada KRL pertama kali diperoleh dari pantograf. Sehingga, apabila pantograf tidak bekerja atau tidak memiliki efisiensi yang diharapkan maka besarnya daya yang diterima oleh komponen sistem *propulsi* yang lain akan berkurang.
2. Sebaiknya dilakukan perhitungan rugi-rugi pada sistem *auxiliary* KRL, sehingga rugi-rugi sistem *propulsi* pada KRL lebih detail.

6 REFERENSI

Buhrkall, L. Traction System Case Stud. Denmark.

Frey, Sheilah. 2012. Railway Electrification Systems and Engineering.

Iftadi, Irwan. 2015. Kelistrikan Industri. Yogyakarta: Graha Ilmu.

Maghfiroh, Hari. 2016. Dunia Kereta Sistem Propulsi KRL, <http://www.keretalistrik.com/2016/07/dunia-kereta-sistem-propulsi-krl.html>. diakses pada hari Sabtu, 4 Nopember 2017, pukul 14.15 WIB.

Mantila, S. Cornio E. Romero L. F. 2008. How The Efficiency of Induction Motor is Measured?. Department of Electrical Engineering and Energy. Universidad de Cantabria, Spain.

Matsumoto Masakazu, Seikon Shibichi, and Wajima Takenori. 2005. Latest System Technology for Railway Electronic Cars.

Maulana, Eka. 2012. Pengaturan PWM. Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan. Universitas Brawijaya Malang.

Nugroho, Setiyo dan Ir. Bambang Winardi. 2012. Sistem Propulsi dan Auxiliary pada Kereta Rel Listrik. Semarang: Teknik Elektro, UNDIP.

Rao, Noman dan Dinesh Chamund. 2014. Calculating Power Loss in an IGBT Module.

Rashid, Muhammad Hannur. Power Electronics Circuit, Devices, and Application. PURDUE UNIVERSITY.

Rd, Gilbert dan Richmond, B.C. 1999. Powersim Tehnologies Inc. Canada.

Sudibya, Samuel, dkk. 2016. Analisis Efisiensi Motor Induksi pada Kondisi Tegangan Non Rating dengan Metode Segregated Loss. Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik UNIB.

Wang Ji. Zhongping Yang, dkk. 2013. Harmonic Loss Analysis of the Traction Transformer of High-speed Trains Considering Pantograph-OCS Electrical Contact Properties. School of Electrical Engineering, Beijing.

_____. 2011. Petunjuk Operasi KRL-KFW. PT. INKA (Persero)

7 BIOGRAFI



Sri Indah Lestari, lahir di Boyolali pada tanggal 22 Desember 1995. Saat ini sedang menempuh pendidikan di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik angkatan 2014.