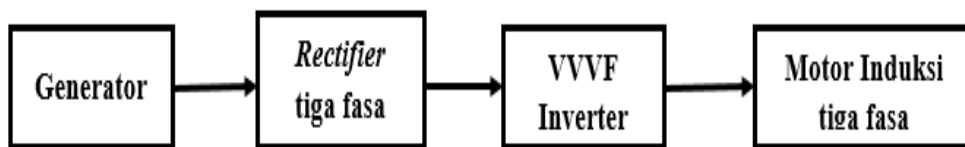


BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Pada bagian ini akan dibahas mengenai perhitungan nilai rugi-rugi yang terdapat pada setiap komponen sistem propulsi Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE). Adapun tahapan dari pembahasan pada bagian ini dapat dilihat berdasarkan gambar skema dibawah ini:



Gambar 4.1 Skema runtutan analisis komponen KRDE

Berdasarkan gambar skema diatas bahwa bagian komponen KRDE yang pertama akan dibahas adalah generator sinkron atau alternator. Pada sistem propulsi KRDE jenis generator yang digunakan berupa generator sinkron tiga fasa yang mana berfungsi sebagai penghasil energi listrik. Keluaran dari generator sinkron digunakan untuk menyuplai beban listrik yang terdapat pada KRDE terutama pada sistem propulsi. Pembahasan pada komponen generator berupa daya yang dihasilkan oleh generator. Acuan dari pembahasan tersebut berdasarkan pada data teknis generator yang digunakan pada KRDE.

Komponen kedua yang akan dianalisis setelah generator adalah penyearah tiga fasa. Penyearah tiga fasa pada sistem propulsi merupakan komponen pertama yang menyalurkan hasil keluaran dari generator sinkron tiga fasa. Hasil keluaran generator sinkron berupa tegangan bolak-balik (AC) yang mana akan dikonversi menjadi tegangan searah (DC). Pada bagian ini, akan dibahas mengenai rugi-rugi

daya yang terdapat pada penyearah tiga fasa dengan menggunakan komponen utama berupa dioda. Jumlah dioda pada rangkaian penyearah ini adalah enam buah dengan disusun menjadi jembatan dioda. Hasil dari simulasi ini akan ditampilkan dalam bentuk gelombang tegangan dan dianalisis dengan menggunakan perhitungan manual.

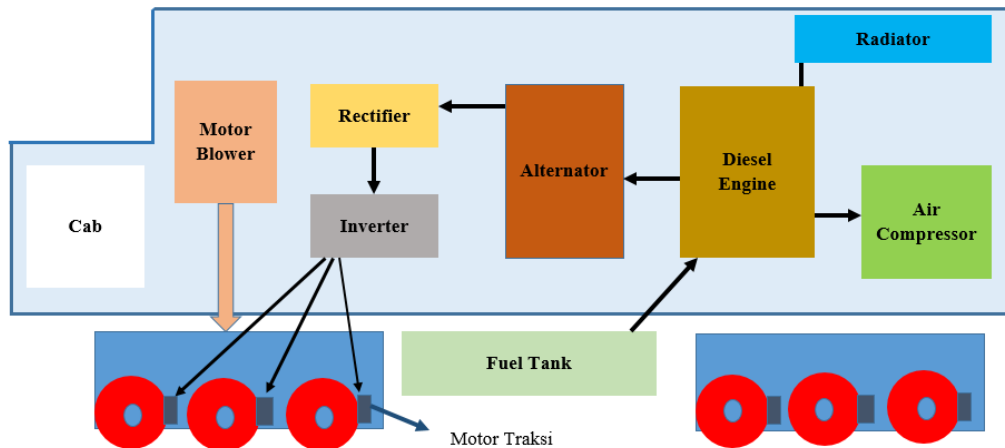
Komponen ketiga yang akan dianalisis setelah penyearah tiga fasa adalah VVVF (*Variable Voltage Variable Frequency inverter*) yang mana merupakan inverter tiga fasa yang mempunyai keluaran berupa tegangan dan frekuensi yang variabel. VVVF *inverter* akan meneruskan hasil output dari penyearah tiga fasa yang berupa tegangan DC. Tegangan DC tersebut selanjutnya akan dikonversikan menjadi tegangan AC yang bernilai variabel bersamaan dengan frekuensinya. Hasil keluaran dari *inverter* tersebut dapat digunakan sebagai pengendalian terhadap motor traksi yang terdapat pada KRDE yang mana membutuhkan tegangan dan frekuensi yang variabel sesuai dengan kebutuhan beban. Selain itu, pada pembahasan ini juga akan dibahas mengenai rugi-rugi yang terjadi pada VVVF *inverter*.

Komponen terakhir yang akan dianalisis berupa motor traksi. Pada KRDE di pembahasan ini motor traksi yang digunakan berupa motor induksi tiga fasa sebagai penggerak kereta utama. Pada pembahasan ini akan dilakukan analisis tentang perhitungan rugi-rugi yang terdapat pada motor induksi tiga fasa. Adapun acuan utama dari perhitungan rugi-rugi berupa data teknis motor induksi tiga fasa yang digunakan pada KRDE.

4.2 Lokomotif pada Kereta Rel Diesel Elektrik

Gambar 4.2 merupakan lokomotif dari kereta rel diesel elektrik yang mana menggunakan transmisi listrik untuk menggerakkan motor traksi. Pada lokomotif KRDE dilengkapi dengan mesin diesel dan berbagai komponen yang mendukung kelancaran kereta. Pada lokomotif tersebut mempunyai dua boogie dengan konfigurasi C-C, yaitu terdapat tiga roda disetiap boogie dan setiap roda digerakkan

oleh motor traksi. Motor traksi akan mendapatkan energi listrik melalui *inverter* yang berasal dari alternator dan telah diserahkan oleh *rectifier* terlebih dahulu.



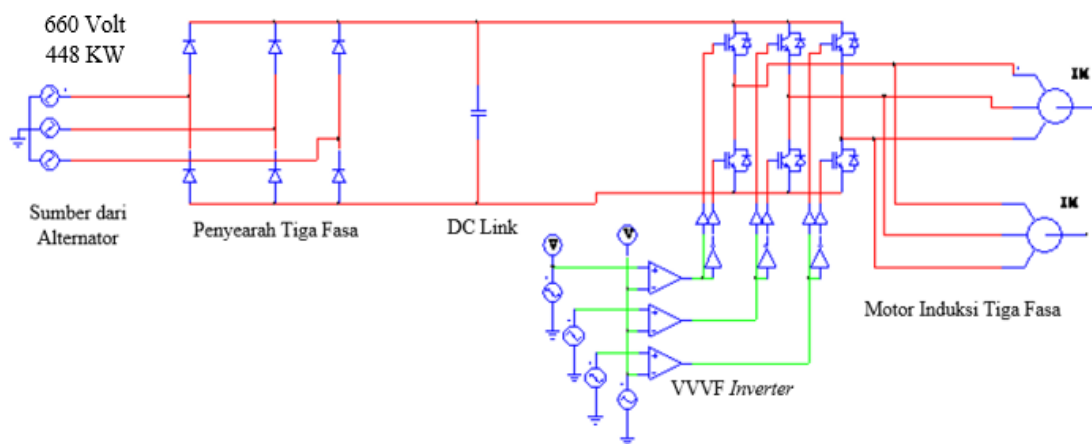
Gambar 4.2 Lokomotif pada KRDE

Adanya motor blower pada gambar tersebut berfungsi untuk mendinginkan *rectifier* dan *inverter* dan digunakan untuk mengatur suhu yang terdapat pada ruangan lokomotif. Sedangkan, untuk menjaga temperatur pada mesin diesel, maka menggunakan radiator dengan tujuan agar diesel berada pada suhu optimal mesin. Mesin diesel juga digunakan sebagai tenaga penggerak pada kompresor udara yang dimanfaatkan untuk sistem pneumatik. Selain itu, pada lokomotif juga dilengkapi dengan kabin masinis (*cab*) yang mana terdapat meja kemudi (*stand control*) dan panel kontrol (*electronic control*). Pada panel kontrol berfungsi untuk mengendalikan *rectifier/inverter*, pencahayaan dan berkaitan dengan kelistrikan lainnya.

4.3 Sistem Propulsi Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE)

Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) merupakan bentuk kereta rel yang memanfaatkan mesin diesel sebagai sumber tenaga listrik. Mesin diesel pada kelistrikan kereta rel diesel elektrik digunakan sebagai penggerak mula atau *prime*

mover. Mesin diesel merupakan jenis mesin dengan pembakaran dalam atau disebut dengan motor bakar. Mesin diesel pada KRDE berfungsi untuk menghasilkan energi mekanis yang dibutuhkan untuk memutar rotor pada generator. Pada KRDE mesin diesel dihubungkan dengan generator dalam satu poros untuk dapat membangkitkan listrik. Berikut merupakan gambar skema secara umum dari sistem propulsi pada KRDE:



Gambar 4.3 Rangkaian umum sistem propulsi pada KRDE

Keluaran dari generator berupa listrik bolak-balik (AC) yang mana digunakan sebagai sumber listrik tiga fasa untuk beban listrik yang terdapat pada KRDE. Untuk dapat menyalurkan energi listrik ke *propulsion load*, generator atau alternator harus melewati penyearah tiga fasa terlebih dahulu. Penyearah tiga fasa ini berfungsi untuk mengkonversikan tegangan bolak-balik (AC) hasil keluaran dari generator menjadi tegangan searah (DC). Hasil keluaran dari penyearah yang berupa tegangan searah (DC) akan diteruskan ke VVVF *Inverter* untuk menghasilkan keluaran tiga fasa berupa tegangan bolak-balik (AC) dan frekuensi yang variabel sesuai dengan kebutuhan motor traksi yang berupa motor induksi tiga fasa.

4.3 Generator Sinkron Tiga Fasa

Pada bagian ini akan menguraikan tentang data teknis generator sinkron yang digunakan dalam KRDE. Generator sinkron pada KRDE merupakan hal yang sangat penting dalam kelistrikanya. Hal tersebut karena keluaran dari generator sinkron akan menunjang kebutuhan sumber listrik di berbagai beban listrik pada KRDE. Berikut merupakan data teknis dari generator sinkron pada KRDE:

4.3.1 Data Spesifikasi

Tabel 4 Data teknis generator sinkron

Daerah Kerja	Nilai
Daya Keluaran	560 KVA
Daya Keluaran	448 KW
Faktor daya	0,8
Jumlah kutub	4
Tegangan	660 V
Arus	489,87 A
Frekuensi	60 Hz
Putaran	1800 rpm
Arus Medan	115 A
Tegangan Eksitasi	167 V
Hambatan stator eksiter	1,09 Ohm

4.3.2 Perhitungan Daya keluaran

Berdasarkan data teknis diatas, keluaran daya pada generator sinkron sebesar 560 KVA untuk daya semu dan 448 KW untuk daya aktif. Berikut merupakan perhitungan daya output generator berdasarka data diatas :

- a. Perhitungan daya output apabila dihitung berdasarkan tegangan terminal, arus, dan faktor daya, maka nilai daya aktif yang dihasilkan oleh generator sebagai berikut:

$$P_{out} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \phi$$

$$P_{out} = \sqrt{3} \times 660 \times 489,87 \times 0,8$$

$$P_{out} = 448 \text{KW}$$

- b. Perhitungan nilai daya output apabila dihitung berdasarkan daya semu dan faktor daya pada generator, maka nilai daya aktif yang dihasilkan oleh generator sebagai berikut:

$$P_{out} = S \times \text{PF}$$

$$P_{out} = 560 \times 0,8$$

$$P_{out} = 448 \text{KW}$$

Pada sistem kelistrikan KRDE, tegangan terminal generator sinkron dituntut untuk bekerja stabil dalam sistem. Adanya perubahan beban maka akan mengakibatkan arus beban (I_a) yang berubah-ubah juga. Perubahan tersebut akan mempengaruhi resistansi (R_a) dan reaktansi sinkron (X_s) atau disebut dengan impedansi sinkron (Z_s). Perubahan arus beban juga akan mengubah nilai tegangan induksi jangkar (E_a) sesuai dengan persamaan $V_t = E_a - I_a (R_a + jX_s)$. Oleh karena itu, agar tegangan terminal tetap stabil maka perlu diatur tegangan induksinya (E_a). Sedangkan, tegangan induksi dapat diatur dengan mengatur jumlah putaran (n) dan flux magnetik (ϕ).

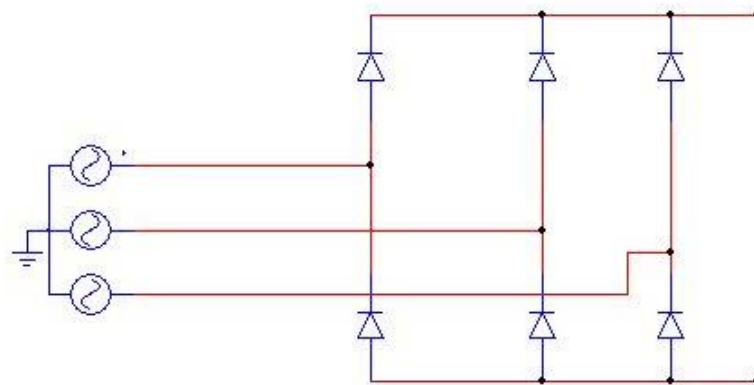
Pengaturan jumlah putaran melibatkan penggerak mula, karena kecepatan rotor diputar dengan menggunakan energi mekanis. Sedangkan pengaturan fluksi magnetik akan melibatkan eksitasi yang mana memberikan tegangan DC (V_f) pada kumparan medan. Tegangan Eksitasi pada rangkaian tertutup akan menimbulkan arus DC (I_f). Kumparan medan yang dialiri arus DC akan menghasilkan fluks yang mana akan ikut berputar ketika rotor diputar oleh penggerak mula, sehingga mengakibatkan timbul GGL pada jangkar karena perputaran fluks yang memotong

kumparan jangkar. Adanya sumber eksitasi yang mensuplai arus medan searah (DC) pada kumparan medan di rotor akan menyebabkan adanya arus searah yang mengalir pada kumparan medan. Arus inilah yang akan mengakibatkan rugi-rugi pada kumparan rotor yang mengakibatkan panas.

Fluk magnet yang dihasilkan oleh kumparan rotor tidak sepenuhnya tercakup oleh kumparan stator. Dengan perkataan lain, bahwa pada kumparan stator terdapat fluk bocor yang mana dinyatakan dengan hambatan armatur (R_a). Selain itu, dengan adanya beban yang terpasang pada output generator sinkron, maka akan segera mengalir arus armatur (I_a) sehingga hal tersebutlah yang akan menyebabkan rugi-rugi pada stator yang berupa panas. Oleh karena itu, untuk menghitung besarnya rugi-rugi yang terdapat pada generator sinkron harus diketahui nilai dari parameter R_f dan R_a .

4.4. Penyearah Tiga Fasa

Pada sistem kelistrikan KRDE *Rectifier* atau penyearah berfungsi untuk meneruskan hasil keluaran dari generator yang berupa tegangan bolak-balik (AC). Tegangan keluaran genarator merupakan jenis tegangan tiga fasa AC yang mana akan disearahkan untuk menjadi tegangan DC. Pada bagian ini, prinsip kerja penyearah tiga fasa akan disimulasikan dengan menggunakan *software* PSIM. Rangkaian penyearah ini menggunakan penyearah gelombang penuh dengan komponen utama berupa dioda yang berjumlah enam buah. Berikut merupakan rangkaian untuk penyearah tiga fasa :

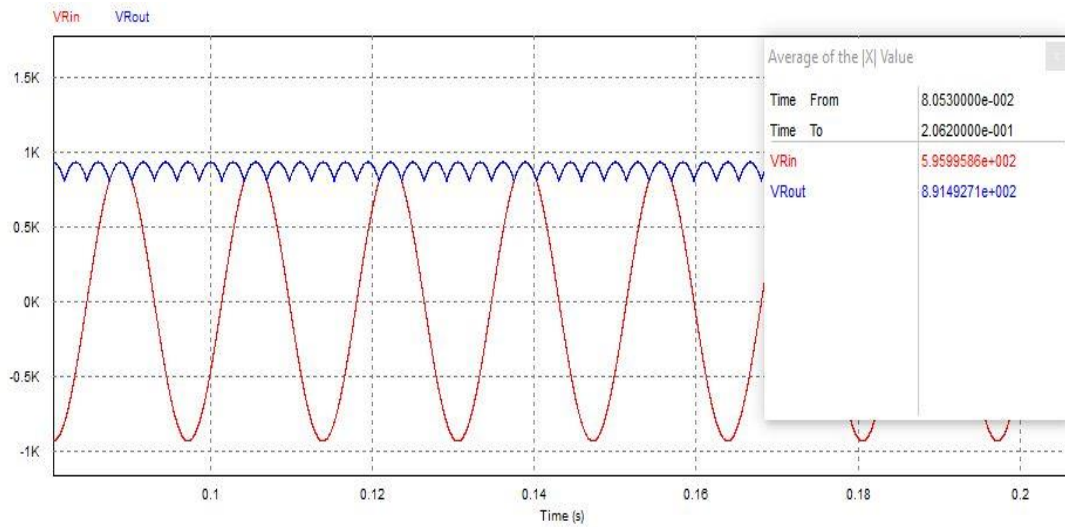


Gambar 4.4 Rangkaian *Three-phase rectifier*

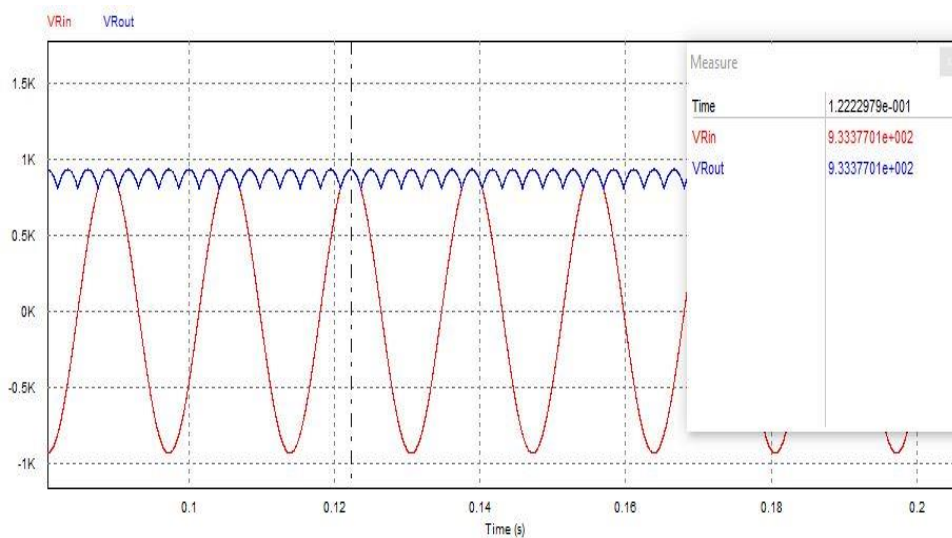
Rangkaian diatas merupakan gambaran umum untuk penyearah tiga fasa sebagai fungsi dari penyearah pada sistem kelistrikan di KRDE. Penyearah tersebut menggunakan masukan tegangan tiga fasa sebesar 660 Volt yang merupakan hasil keluaran dari generator sinkron. Penyearah tiga fasa dengan enam dioda yang digunakan dalam rangkaian tersebut merupakan jenis penyearah gelombang penuh yang akan bekerja dengan menyearahkan semua siklus gelombang sinus. Oleh karena itu, dua dioda akan terus menerus menghantarkan untuk menghasilkan lintasan output DC yang lengkap. Dioda dengan tegangan katoda yang sebgaiian besar positif akan dihantarkan. Dioda dengan tegangan negatif juga akan dihantarkan. Hal ini karena penyearah jenis jembatan akan merubah baik setengah positif atau setengah negatif dari tegangan AC menjadi DC. Pada penyearah gelombang penuh ini akan menghasilkan gelombang yang lebih rapat karena merupakan gabungan dari siklus sinyal positif dan siklus sinyal negatif. Oleh karena itu, penyearah akan tetap mengeluarkan output pada periode gunung dan lembah dari sinyal sinus.

4.4.1 Tegangan Keluaran Penyearah Tiga Fasa

Prinsip kerja ditampilkan berdasarkan hasil simulasi rangkaian pada gambar 4.3 diatas. Berikut merupakan hasil simulasi dari rangkaian tersebut:



Gambar 4.5 Gelombang Vdc *Three-phase rectifier*



Gambar 4.6 Gelombang tegangan puncak DC

Berdasarkan hasil simulasi penyearah tiga fasa pada gambar 4.5 dan 4.6, menjelaskan bahwa gelombang VRin yang berbentuk gelombang sinus merupakan tegangan masukan penyearah. Sedangkan, VRout merupakan gelombang keluaran dari penyearah yang sudah disearahkan. Selain itu, hasil simulasi pada gambar 4.4 menyatakan bahwa nilai tegangan keluaran penyearah sebesar 891 Volt. Sedangkan, untuk tegangan puncak dari

penyearah menghasilkan 933 volt . Apabila dibuktikan berdasarkan teori, maka sebagai berikut:

a. Tegangan rata-rata penyearah

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times V_{in}$$

$$V_{dc} = 1.35 \times 660$$

$$V_{dc} = 891 \text{ Volt}$$

b. Tegangan puncak penyearah

$$V_{peak} = \sqrt{2} \times V_{in}$$

$$V_{peak} = 1.414 \times 660$$

$$V_{peak} = 933.3 \text{ Volt}$$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, membuktikan bahwa nilai tegangan keluaran penyearah antara hasil perhitungan dengan hasil simulasi adalah sama sebesar 891 Volt untuk tegangan rata-rata dan 933 Volt untuk tegangan puncak.

4.4.2 Rugi-rugi pada Penyearah Tiga Fasa

Tabel 5. *Datasheet* dioda

Primary Characteristics	
$I_{F(AV)}$	3.0 A
V_{RRM}	50 V, 100 V, 200 V, 300 V, 500 V, 600 V, 800V, 1000V
I_{FRM}	200A

I_R	5.0uA
V_F	1.2V

Berdasarkan data diatas, maka perhitungan rugi-rugi dari penyearah tiga fasa sebagai berikut:

1) Rugi-rugi pada dioda

$$P_{\text{dioda}} = V_f \times I_f$$

$$P_{\text{dioda}} = 1.2 \times 3$$

$$P_{\text{dioda}} = 3.6 \text{ Watt}$$

2) Rugi-rugi total penyearah

$$P_{\text{losstot}} = 6 \times P_{\text{loss}}$$

$$P_{\text{losstot}} = 6 \times 3.6$$

$$P_{\text{losstot}} = 21.6 \text{ Watt}$$

3) Daya keluaran penyearah

$$P_{\text{rect}} = P_{\text{in}} - P_{\text{losstot}}$$

$$P_{\text{rec}} = 448000 - 21,6$$

$$P_{\text{rect}} = 447,978 \text{ KW}$$

4) Efisiensi

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

$$\eta = \frac{447,978}{448} \times 100\%$$

$$\eta = 99,99\%$$

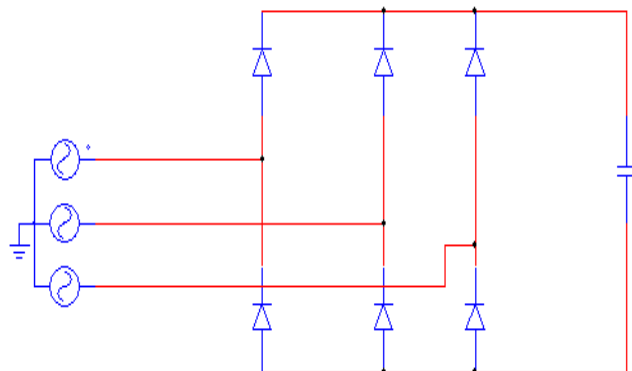
Apabila dibuat suatu tabel, maka besarnya rugi-rugi pada penyearah sebagai berikut:

Tabel 6. Rugi-rugi pada penyearah tiga fasa

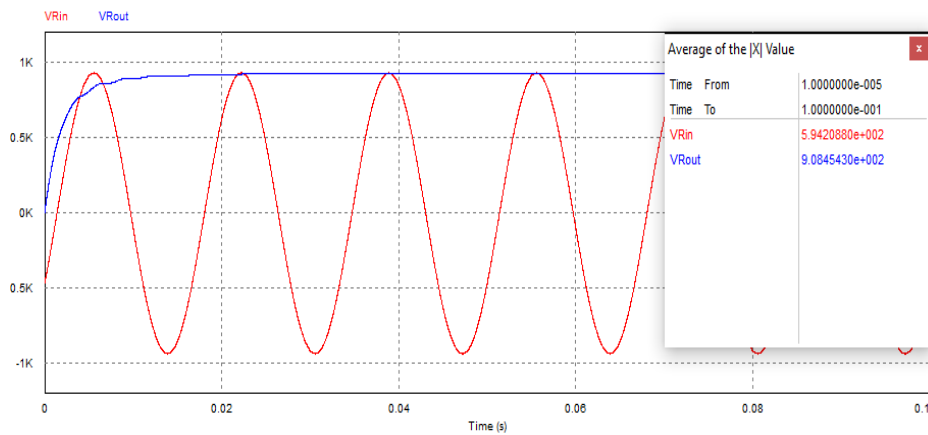
V input	P input	V output	P output	Rugi-rugi	Effisiensi
660 V	448 KW	981 V	447,978 KW	21,6 W	99,99%

4.4.3 Filter Kapasitor

Pada kelistrikan KRDE, terdapat komponen DC link setelah komponen penyearah. Hal tersebut karena apabila dilihat dari gambar 4.5 bentuk gelombang keluaran dari penyearah tiga fasa, terlihat bahwa gelombang belum menghasilkan tegangan DC murni. Dalam gelombang tersebut masih terdapat sejumlah tegangan AC yang bercampur dengan tegangan DC atau disebut dengan riak atau *ripple*. Oleh karena itu, untuk menekan *ripple* pada penyearah dengan menambahkan filter berupa kapasitor yang digunakan sebagai perata tegangan. Berikut merupakan rangkaian penyearah tiga fasa dengan menggunakan kapasitor beserta hasil simulasi keluarannya:



Gambar 4.7 Rangkaian penyearah dengan menggunakan filter



Gambar 4.8 Hasil simulasi penyearah setelah penambahan filter

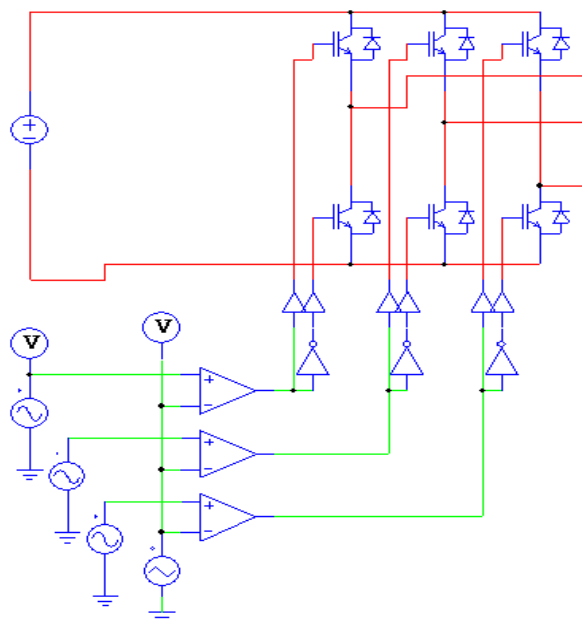
Pada gambar diatas terlihat bahwa penambahan filter kapasitor pada rangkaian penyearah menjadikan *ripple* pada gelombang keluaran menjadi ditekan. Sehingga setelah penambahan kapasitor maka keluaran dari penyearah gelombang penuh tiga fasa menjadi rata atau sesuai dengan tegangan searah (DC). Selain itu, setelah penambahan filter kapasitor hasil tegangan keluaran mendekati tegangan puncak, yaitu 933,3 Volt dengan bentuk gelombang tegangan searah relatif murni. Hal ini karena menambahkan kapasitor yang diparelelkan dengan beban, maka *ripple* tegangan akan sangat ditekan karena kapasitor dapat menyimpan energi.

Filter kapasitor pada penyearah bekerja dengan melakukan pengisian energi ketika dioda konduksi, sedangkan akan melepaskan energi ketika dioda tidak konduksi. Ketika dioda konduksi kapasitor akan mengisi dengan cepat hingga mendekati tegangan puncak. Dengan demikian beban akan tetap memperoleh energi ketika dioda tidak konduksi. Hal ini karena kapasitor berfungsi sebagai tempat penyimpanan yang menerima energi pada beban puncak dan mensuplai energi untuk beban saat keluaran penyearah rendah.

4.5 VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) Inverter

Pada bagian ini akan dilakukan pembahasan mengenai VVVF *Inverter* pada sistem propulsi Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE). VVVF *Inverter* merupakan jenis *inverter* tiga fasa yang mempunyai tegangan dan frekuensi bersifat variabel. Tegangan inputan *inverter* berupa tegangan searah (DC) yang berasal dari *Three-phase rectifier* atau penyearah tiga fasa, yaitu 933,3 Volt. Tegangan searah (DC) selanjutnya akan dikonversi untuk menghasilkan tegangan AC. Dengan menggunakan teknik penyaklaran pada inverter frekuensi juga dapat diubah-ubah untuk mendapatkan kecepatan motor yang diinginkan.

Pengendalian saklar dalam *inverter* pada pembahasan ini menggunakan teknik PWM (*Pulse Width Modulation*) karena dapat mengatur tegangan dan frekuensi yang variabel. Komponen utama yang digunakan sebagai saklar dalam pembahasan ini berupa komponen semikonduktor, yaitu IGBT. Hasil keluaran dari VVVF selanjutnya digunakan untuk memutar motor traksi AC yang membutuhkan nilai frekuensi dan tegangan yang variabel. Berikut merupakan rangkaian secara umum dari *inverter* tiga fasa yang berperan sebagai VVVF *inverter*:



Gambar 4.9 Rangkaian VVVF *Inverter*

Dalam pembahasan ini akan dilakukan analisis terhadap rugi-rugi yang terjadi pada *VVVF Inverter*. Terdapat lima kondisi berbeda yang didasarkan atas kebutuhan beban terhadap tegangan dan frekuensi. Oleh karena itu, dalam setiap keadaan akan mempunyai nilai tegangan dan frekuensi *output* yang berbeda-beda.

Adapun rugi-rugi pada *inverter* ini terdiri atas dua macam, yaitu rugi dioda yang terdiri atas rugi konduksi dan rugi IGBT yang terdiri atas rugi-rugi konduksi dan rugi-rugi penyaklaran. Rugi-rugi konduksi pada *inverter* yang menggunakan PWM dipengaruhi oleh *duty cycle*, sedangkan untuk rugi-rugi penyaklaran dipengaruhi oleh frekuensi penyaklaran. Berdasarkan *datasheet* IGBT tipe BSM 200 GA DN2, maka parameter dari IGBT sebagai berikut:

Tabel 7. Parameter rugi-rugi pada IGBT

Parameter	Simbol	Nilai
Colector-Emitter Saturation Voltage	V _{ge}	15 Volt
	I _c	200 A
	V _{ce(sat)}	5,3 Volt
	T _j	125°C
E _{ON}	V _{cc}	1200 Volt
	V _{ge}	15 Volt
	I _c	200 A
	R _{gon}	6,8 Ohm
E _{OFF}	V _{cc}	1200 Volt
	V _{ge}	-15 Volt
	I _c	200A
	R _{goff}	6,8 Ohm

Tabel 8. Parameter rugi-rugi dioda pada *inverter*

Primary Characteristics	
I_F	2.1 A
I_F	200A
V_{ge}	0
T_j	125°C

Berdasarkan data parameter diatas, maka rugi pada VVVF *inverter* sebagai berikut:

a. Rugi konduksi

$$P_{cond} = V_{ce(sat)} \times I_c$$

$$P_{cond} = 5,3 \times 200$$

$$P_{cond} = 1060 \text{ Watt}$$

b. Rugi Eon

$$E_{on} = \frac{V^2}{R}$$

$$E_{on} = \frac{V^2}{R}$$

$$E_{on} = \frac{15^2}{6,8}$$

$$E_{on} = 33,088 \text{ Watt}$$

Sedangkan untuk besarnya switch saat on adalah 0 Volt, karena pada tabel data diatas, tertera bahwa $V_{ge} = -15$ V atau tegangan negatif sehingga berarti IGBT menahan arus. Sedangkan rugi-rugi dari dioda berdasarkan *datasheet* sebagai berikut:

$$P_{\text{dioda}} = V_f \times I_f$$

$$P_{\text{dioda}} = 2.1 \times 200$$

$$P_{\text{dioda}} = 420 \text{ Watt}$$

Maka rugi total dari dioda pada VVVF inverter, sebagai berikut:

$$P_{\text{totdioda}} = 6 \times 420$$

$$P_{\text{totdioda}} = 2,52 \text{ KW}$$

Berikut merupakan lima keadaan untuk menganalisis rugi-rugi pada VVVF

Inverter:

Tabel 9. Lima keadaan kebutuhan beban

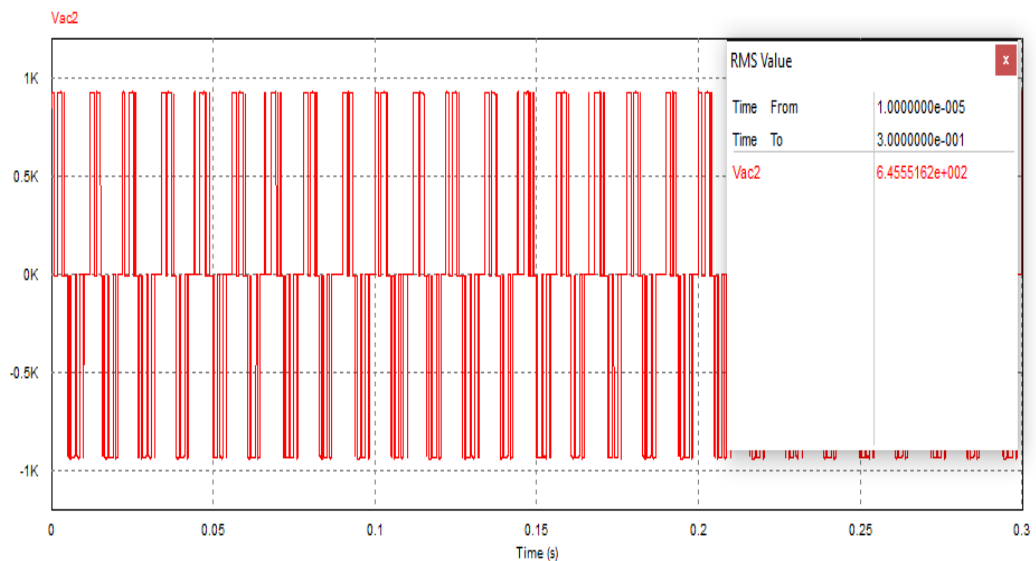
Pin (KW)	Vout (V)	f (Hz)	Ipk (A)
447,978	645	90	231,511
	635	36,38	235,209
	493,9	28	302,285
	321	18,2	456,19
	160,5	9	930

4.5.1 Rugi-rugi VVVF *Inverter*

Pada bagian ini akan dilakukan analisis terhadap rugi-rugi *inverter* tiga fasa dengan menggunakan frekuensi penyaklaran sebesar 500 Hz.

1) Keadaan pertama

Pada keadaan pertama keluaran *inverter* akan diatur untuk mendapatkan tegangan keluaran sebesar 645 volt dan frekuensi 90 Hz. Keluaran tersebut selanjutnya akan digunakan untuk memutar motor dengan kecepatan putaran 2634 rpm. Hasil simulasi sebagai berikut:



Gambar 4.10 Gelombang keluaran VVVF *Inverter* saat keadaan 1

Untuk mendapatkan tegangan sebesar 645 volt pada keluaran *inverter*, maka rangkaian menggunakan indek modulasi sebesar:

$$D = \frac{A_r}{A_c}$$

$$D = \frac{2,28}{4}$$

$$D = 0,57$$

Sehingga rugi-rugi yang terjadi pada VVVF *Inverter* sebagai berikut:

a) Rugi disipasi

$$P_{\text{cond}} = P_{\text{cond}} \times D$$

$$P_{\text{cond}} = 1060 \times 0,57$$

$$P_{\text{cond}} = 604,2 \text{ Watt}$$

b) Rugi penyaklaran

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

$$P_{\text{sw}} = \frac{33,088 \times 231,511 \times 500 \times 933,3}{\pi \times 290 \times 1700}$$

$$P_{\text{sw}} = 2,308 \text{ KW}$$

c) Rugi-rugi total

$$P_{\text{igbt}} = 6 \times (P_{\text{cond}} + P_{\text{sw}})$$

$$P_{\text{igbt}} = 6 \times (0,604 + 2,308)$$

$$P_{\text{igbt}} = 6 \times 2,912$$

$$P_{\text{igbt}} = 17,472 \text{ KW}$$

Maka,

$$P_{\text{totloss}} = P_{\text{igbt}} + P_{\text{totdioda}}$$

$$P_{\text{totloss}} = 17,472 + 2,52$$

$$P_{\text{totloss}} = 19,992 \text{ KW}$$

d) Daya keluaran

$$P_{\text{out}} = P_{\text{in}} - P_{\text{igbt}}$$

$$P_{\text{out}} = 447,978 - 19,992$$

$$P_{\text{out}} = 427,506 \text{ KW}$$

e) Efisiensi

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

$$\eta = \frac{427,506}{447,978} \times 100\%$$

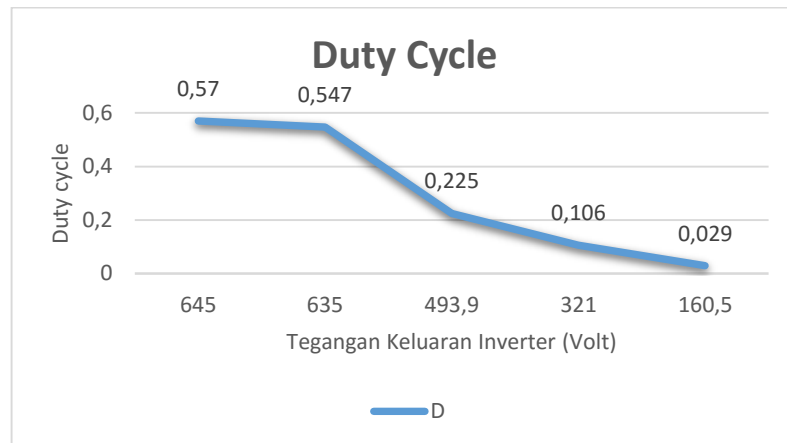
$$\eta = 95,43\%$$

Untuk perhitungan rugi-rugi pada keadaan kedua hingga kelima dapat dilihat pada lampiran 1. Dengan menggunakan cara yang sama seperti pada perhitungan rugi-rugi keadaan pertama, maka rugi-rugi pada VVVF *Inverter* sebagai berikut:

Tabel 10. Rugi-rugi dan Efisiensi pada VVVF *Inverter*

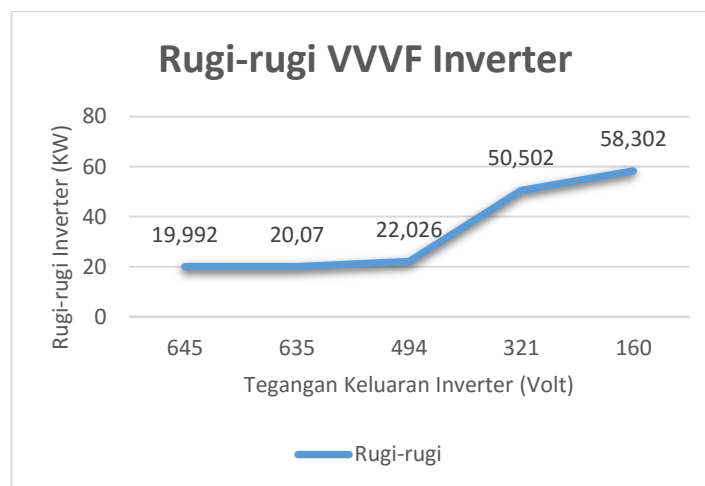
Keadaan ke-	Pin (KW)	D	Vout (V)	f (Hz)	Prugi (KW)	Pout (KW)	Efisiensi
1	447,978	0,57	645	90	19,992	427,586	95,53%
2		0,547	635	36,38	20,07	427,908	95,51%
3		0,225	494	28	22,026	425,952	95,08%
4		0,106	321	18,2	50,502	397,476	88,73%
5		0,029	160	9	58,302	389,676	87,55%

Berdasarkan tabel diatas, apabila dibuat suatu grafik hubungan *Duty cycle* dengan tegangan keluaran *inverter*, sebagai berikut:



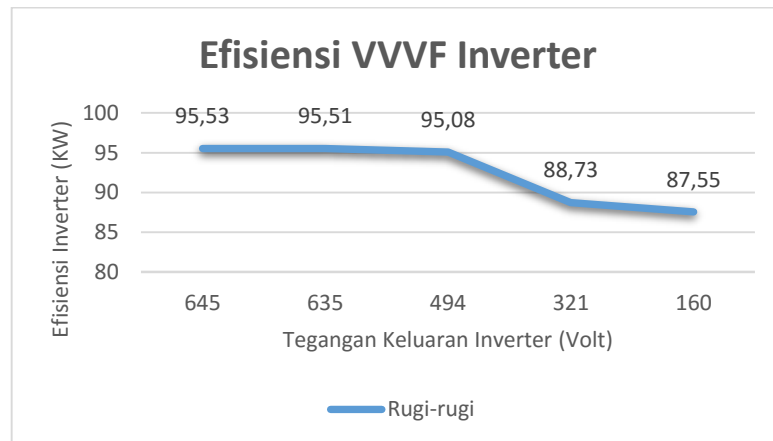
Gambar 4.11 Grafik hubungan antara D dengan Vout

Gambar 4.11 diatas menyatakan bahwa hubungan antara *duty cycle* dengan tegangan keluaran adalah berbanding lurus. Pada VVVF inverter, *duty cycle* ini merupakan perbandingan antara tegangan referensi dengan tegangan *carrier*. Dengan membandingkan kedua tegangan tersebut, maka akan didapatkan tegangan keluaran sesuai dengan yang diinginkan. Besarnya tegangan keluaran pada *inverter*, akan menentukan rugi-rugi yang terjadi pada *inverter* itu sendiri. Apabila dibuat suatu grafik, maka hubungan antara tegangan keluaran dengan rugi-rugi VVVF *inverter* sebagai berikut:



Gambar 4.12 Grafik hubungan tegangan keluaran inverter dengan rugi-rugi

Setelah mengetahui besarnya rugi-rugi yang terjadi pada VVVF *Inverter*, maka didapat suatu efisiensi sebagai berikut:



Gambar 4.13 Grafik Efisiensi inverter terhadap rugi-rugi

4.6 Motor Induksi Tiga Fasa

Pada bagian ini akan dilakukan pembahasan mengenai rugi-rugi pada motor induksi tiga fasa. Motor induksi ini berperan sebagai motor traksi pada KRDE sebagai penggerak utama. Motor ini mendapatkan suplai tegangan dari VVVF *Inverter* yang berupa tegangan dan frekuensi yang variabel untuk diubah menjadi energi mekanik sesuai dengan kebutuhan. Namun, dalam proses pengubahan energi listrik menjadi energi mekanik terdapat rugi-rugi yang terjadi pada mesin sehingga tidak sepenuhnya masukan dari VVVF *Inverter* terkonversi seluruhnya. Rugi-rugi yang terdapat pada motor induksi tiga fasa yaitu rugi-rugi tembaga stator, rugi-rugi inti stator, rugi-rugi tembaga rotor, rugi gesekan dan angin dan lain-lain. Oleh karena itu, pada bagian ini akan dibahas tentang rugi-rugi pada motor induksi tiga fasa yang digunakan pada sistem propulsi Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE) sehingga diperoleh besarnya efisiensi pada mesin tersebut.

Pada pembahasan rugi-rugi yang terdapat pada motor traksi dibagi menjadi dua bagian. Pembahasan pertama yaitu tentang perbandingan rugi-rugi pada motor dengan menggunakan lima keadaan yang berbeda. Sedangkan pembahasan kedua tentang perbandingan rugi-rugi saat motor mempunyai tegangan input yang sama, namun memiliki nilai slip yang berbeda. Berikut merupakan pembahasan mengenai rugi-rugi pada motor induksi tiga fasa:

4.6.1 Rugi-rugi Motor Induksi dengan variasi masukan

Pada bagian ini membahas tentang nilai rugi-rugi motor induksi dengan menggunakan lima sample keadaan yang berbeda. Setiap keadaan memiliki nilai parameter pengukuran yang berbeda-beda, sebagai berikut:

a. Keadaan pertama

Tabel 11. Data teknis motor induksi tiga fasa pada keadaan pertama

Daerah Kerja	Nilai	Daerah Kerja	Nilai
Pshift	200 KW	X1	0,52286 Ohm
Tegangan	645 Volt	X2	0,24223 Ohm
Frekuensi	90 Hz	Xh	0,24223 Ohm
Arus	197,28 A	Φ_g	14,32132 mVs
Putaran	2634 rpm	L1	0,921 mH
Momen	740 Nm	L2	0,422mH
Cos Phi	0,87	Lh	25,326 mH
Efisiensi	93,44%	Rc	667,490 Ohm
Daya gesekan	2331,44 Watt	R1	0,04581 Ohm
I0	25,09 A	R2	0,04080 Ohm

Berdasarkan tabel keadaan diatas, maka rugi-rugi pada motor induksi sebagai berikut:

1) Daya input motor

$$P_{in} = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\theta$$

$$P_{in} = \sqrt{3} \times 645 \times 197,28 \times 0,87$$

$$P_{in} = 191,74 \text{ KW}$$

2) Rugi-rugi tembaga stator

$$P_{ts} = 3 \times I_s^2 \times R_s$$

$$P_{ts} = 3 \times 197,28^2 \times 0,04581$$

$$P_{ts} = 5,349 \text{ KW}$$

3) Rugi-rugi inti stator

$$P_i = \frac{3 \times E_s^2}{R_c}$$

$$P_i = \frac{3 \times 645^2}{667,490}$$

$$P_i = 1,870 \text{ KW}$$

Sehingga rugi-rugi total stator

$$P_s = P_{ts} + P_i$$

$$P_s = 5,349 + 1,870$$

$$P_s = 7,219 \text{ KW}$$

4) Daya rotor = daya celah udara

$$P_{cu} = P_{in} - P_s$$

$$P_{cu} = 191,74 - 7,219$$

$$P_{cu} = 184,521 \text{ KW}$$

5) Rugi-rugi rotor

$$N_s = \frac{120f}{p}$$

$$N_s = \frac{120 \times 90}{4}$$

$$N_s = 2700$$

Maka besarnya slip

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

$$s = \frac{2700 - 2634}{2700}$$

$$s = 0,024$$

Sehingga rugi-rugi pada tembaga rotor

$$P_{tr} = s \times P_{cu}$$

$$P_{tr} = 0,024 \times 184,521$$

$$P_{tr} = 4,428 \text{ KW}$$

6) Daya mekanik

$$P_{mek} = P_{cu} - P_{tr}$$

$$P_{mek} = 184,521 - 4,428$$

$$P_{mek} = 180,093 \text{ KW}$$

7) Rugi gesekan

$$P_g = 2331,44 \text{ W}$$

8) Rugi stray

$$P_b = 1,5\% \times (P_{mek} - P_g)$$

$$P_b = 1,5\% \times (180,093 - 2,33144)$$

$$P_b = 2,666 \text{ KW}$$

9) Rugi-rugi total

$$P_{Losses} = P_{ts} + P_i + P_{tr} + P_g + P_b$$

$$P_{\text{Losses}} = 5,349 + 1,870 + 4,428 + 2,33144 + 2,666$$

$$P_{\text{Losses}} = 16,644\text{KW}$$

10) Daya keluaran

$$P_{\text{out}} = P_{\text{mek}} - P_g - P_b$$

$$P_{\text{out}} = 180,093 - 2,33144 - 2,666$$

$$P_{\text{out}} = 175,096\text{KW}$$

11) Efisiensi

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

$$\eta = \frac{175,096}{191,74} \times 100\%$$

$$\eta = 91,319\%$$

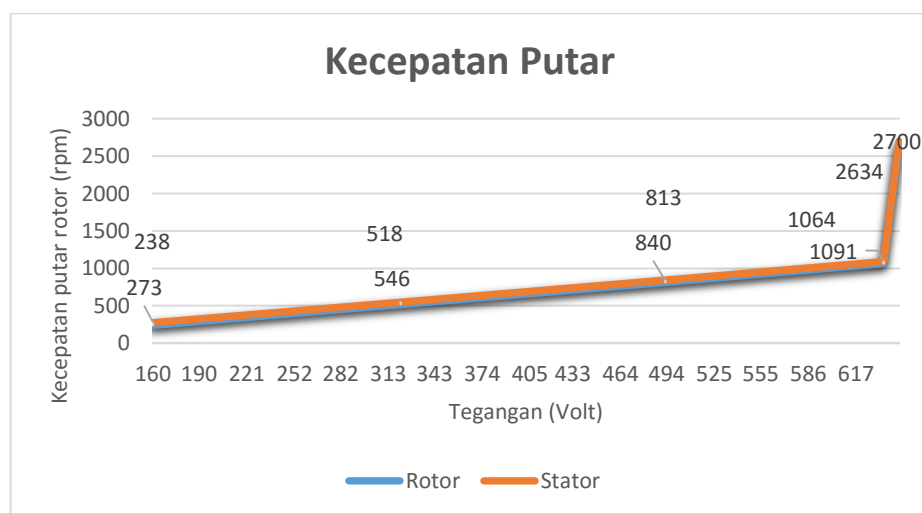
Untuk perhitungan rugi-rugi pada keadaan kedua hingga kelima dapat dilihat pada lampiran 2. Dengan cara yang sama seperti pada perhitungan diatas, maka nilai rugi-rugi dan efisiensi pada motor induksi tiga dengan menggunakan variasi terhadap inputannya sebagai berikut:

Tabel 12. Data rugi-rugi motor induksi tiga fasa

Keadaan ke-	Pin (KW)	Tegangan (V)	Arus (A)	Prugi (KW)	Pout (KW)	Efisiensi (%)
1	191,74	645	197,28	16,644	175,096	91,319
2	212,4	635	217,6	18,211	194,189	91,426
3	165,9	493,9	217,9	16,537	149,363	90,032

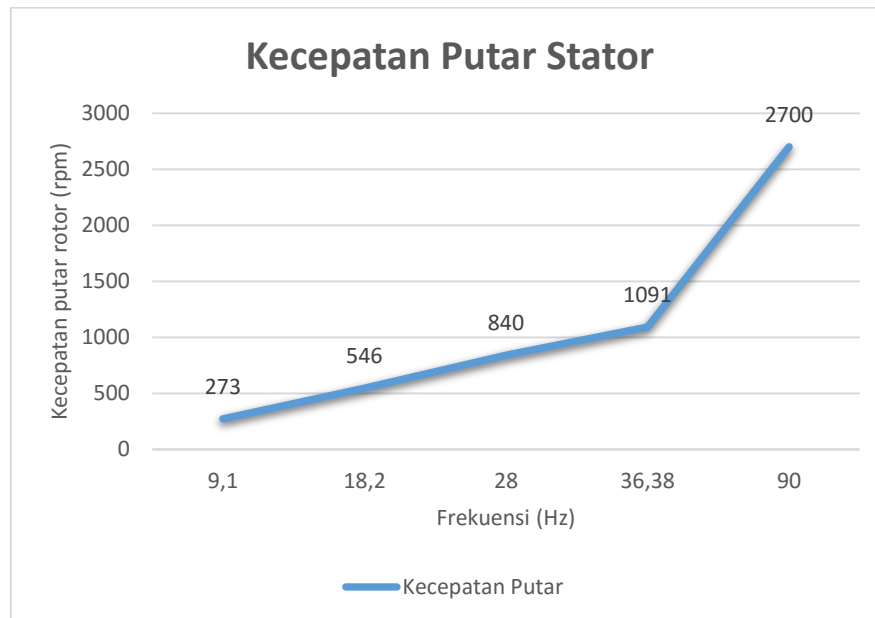
Kedaaan ke-	Pin (KW)	Tegangan (V)	Arus (A)	Prugi (KW)	Pout (KW)	Efisiensi (%)
4	111,04	321	224,4	15,108	95,932	86,394
5	59,893	160,5	247,64	16,423	43,47	71,579

Tabel 12. diatas menyatakan bahwa setiap keadaan motor induksi mempunyai kecepatan putaran yang berbeda-beda. Adanya perbedaan kecepatan putar rotor pada motor induksi disebabkan karena adanya nilai tegangan yang berbeda-beda. Jika dilihat berdasarkan tabel diatas, besarnya tegangan akan sebanding kecepatan putar. Hal tersebut karena tegangan yang diterima oleh stator akan mempengaruhi kopel. Penurunan kopel yang diterima oleh rotor akan mengakibatkan kecepatan putaran motor juga akan berkurang sesuai dengan penurunan tegangan. Kopel pada motor induksi tiga fasa merupakan interaksi antara dua medan magnet dinamik, yaitu medan magnet stator dengan medan magnet rotor. Medan magnet rotor ini berasal dari adanya tegangan induksi yang mana disebabkan oleh terpotong-potongnya kumparan rotor oleh medan putar stator. Apabila dibuat suatu grafik, maka sebagai berikut:



Gambar 4.15 Grafik hubungan tegangan dengan kecepatan motor

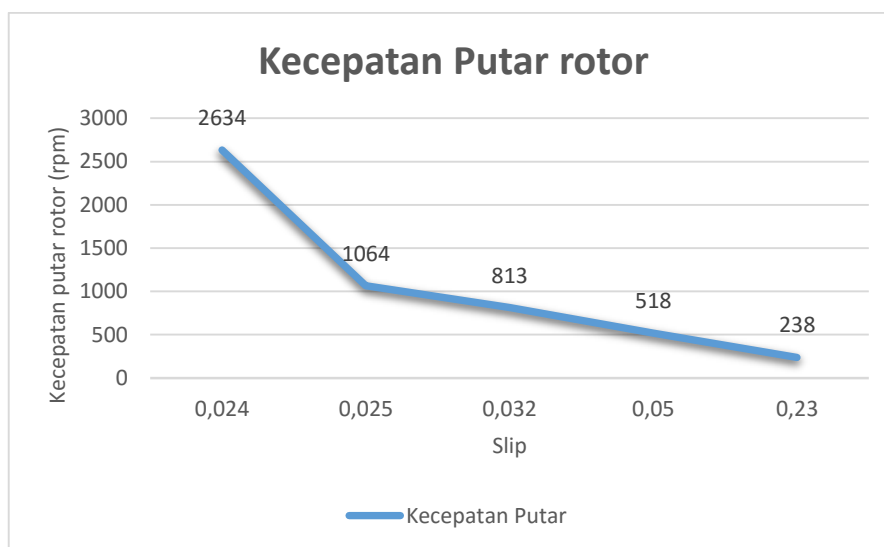
Selain itu, pada perhitungan diatas juga menghasilkan nilai putaran stator yang berbeda-beda yang mana berbanding lurus dengan frekuensi yang digunakan. Pada saat motor induksi menggunakan frekuensi sebesar 36,38 Hz maka menghasilkan putaran sebesar 1091 rpm. Saat motor induksi menggunakan frekuensi sebesar 90 Hz maka menghasilkan putaran sebesar 2700 rpm. Saat motor induksi menggunakan frekuensi sebesar 28 Hz maka menghasilkan putaran sebesar 840 rpm. Saat motor induksi menggunakan frekuensi sebesar 18,2 Hz maka menghasilkan putaran sebesar 546 rpm. Terakhir, saat motor induksi menggunakan frekuensi 9,1 Hz maka menghasilkan putaran sebesar 273 rpm. Hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa besarnya kecepatan putar medan magnet motor induksi dipengaruhi oleh frekuensi sumber yang masuk ke motor melalui kumparan stator. Besarnya putaran pada stator akan berbanding lurus dengan frekuensi sumbernya. Berdasarkan hubungan antara frekuensi dengan putaran stator pada perhitungan diatas, maka Apabila dibuat suatu grafik sebagai berikut:



Gambar 4.16 Grafik hubungan frekuensi dengan kecepatan stator

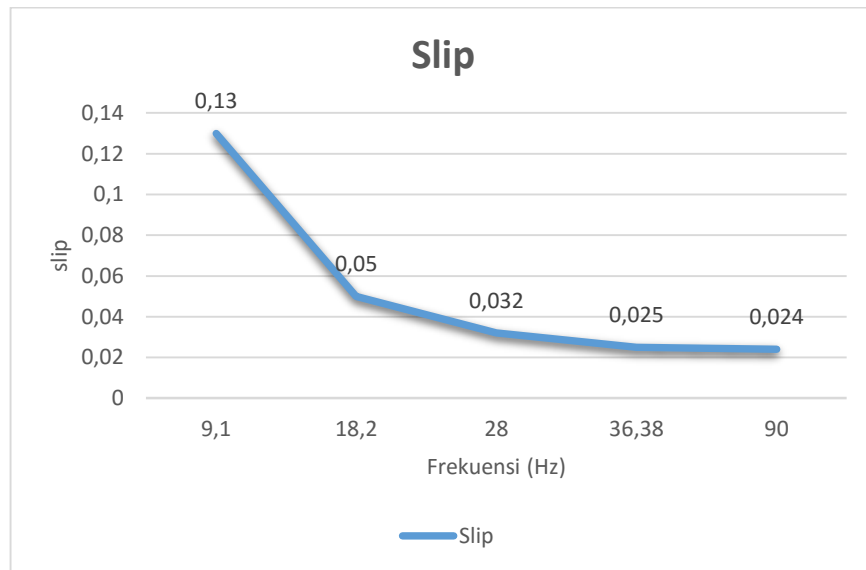
Dalam motor induksi tiga fasa, putaran medan magnet stator akan selalu diikuti oleh putaran rotor motor induksi. Adanya gesekan dan lilitann pada rotor akan menyebabkan putaran rotor berkurang. Selain itu, Beban juga akan

mempengaruhi putaran dari rotor, dimana semakin berat beban maka kecepatan rotor juga akan semakin menurun. Hal tersebut akan mengakibatkan terjadinya perbedaan kecepatan putar antara stator dengan rotor atau disebut slip. Slip pada motor induksi diperlihatkan pada gambar grafik hubungan tegangan dan putaran motor. Sedangkan, untuk hubungan antara slip dan putaran rotor dapat dilihat pada gambar grafik berikut ini:

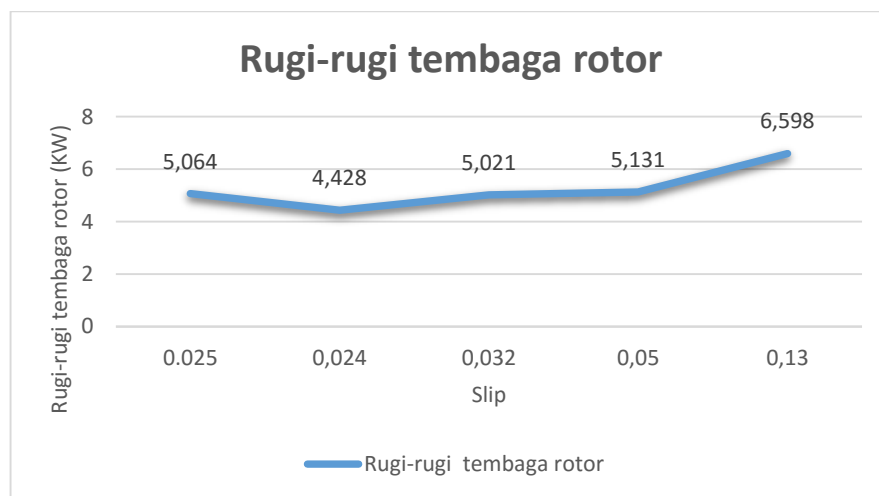


Gambar 4.17 Grafik hubungan slip dengan putaran rotor

Berdasarkan pada perhitungan rugi-rugi motor induksi diatas, slip sangat mempengaruhi besarnya rugi-rugi yang dihasilkan oleh tembaga rotor. Adanya slip mengakibatkan daya listrik yang akan dikonversi menjadi daya mekanik berkurang. Selain itu, pada perhitungan tersebut juga mengatakan bahwa nilai slip berbanding terbalik dengan frekuensi sumber. Semakin besar frekuensi sumber, maka slip yang dihasilkan akan semakin kecil dan sebaliknya. Pernyataan tersebut dibuktikan pada pengamatan dari kelima kondisi motor induksi tiga fasa. Ketika frekuensi sumber sebesar 90 Hz maka slip 0,024, saat frekuensi sumber 36,38 Hz maka slip 0,025, saat frekuensi sumber 28 Hz maka slip 0,032, saat frekuensi sumber 18,2 Hz maka slip 0,05, dan saat frekuensi 0,23 Hz maka slip 0,13. Hal tersebut sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa frekuensi sumber berbanding terbalik dengan slip atau $f_r = s.f$. Berikut merupakan grafik hubungan antara slip dan frekuensi sumber serta pengaruh slip terhadap rugi-rugi motor induksi:

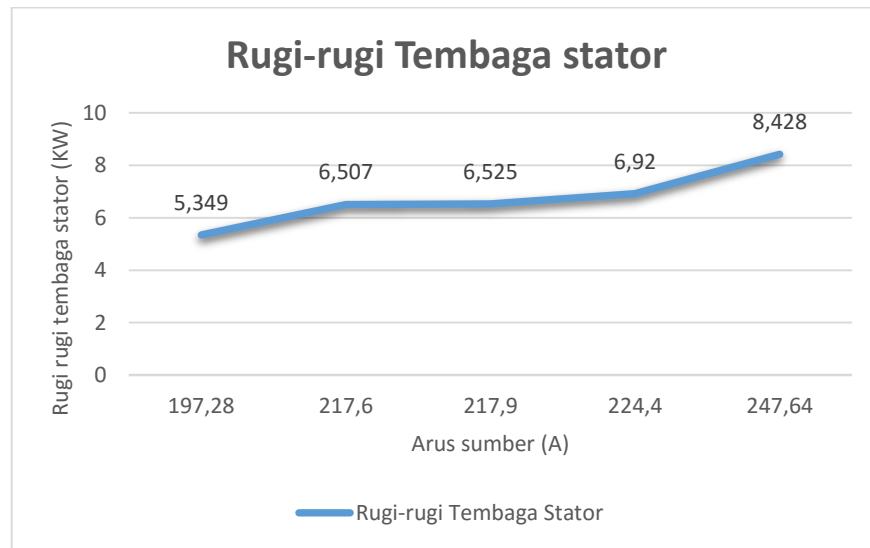


Gambar 4.18 Grafik hubungan frekuensi sumber dengan slip



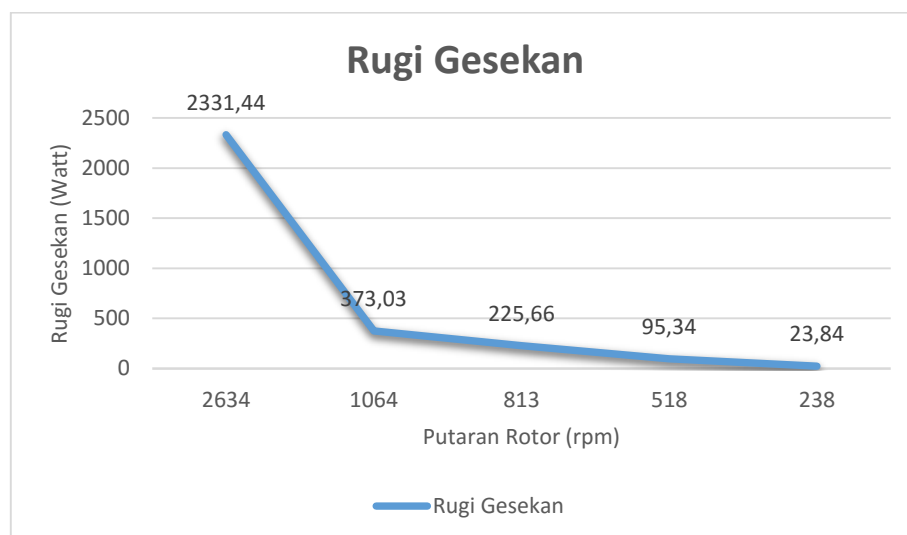
Gambar 4.19 Grafik hubungan rugi-rugi tembaga rotor dengan slip

Selain itu, salah satu penyebab rugi-rugi pada motor induksi meningkat adalah arus. Berikut merupakan hubungan antara arus dan rugi-rugi pada tembaga stator:



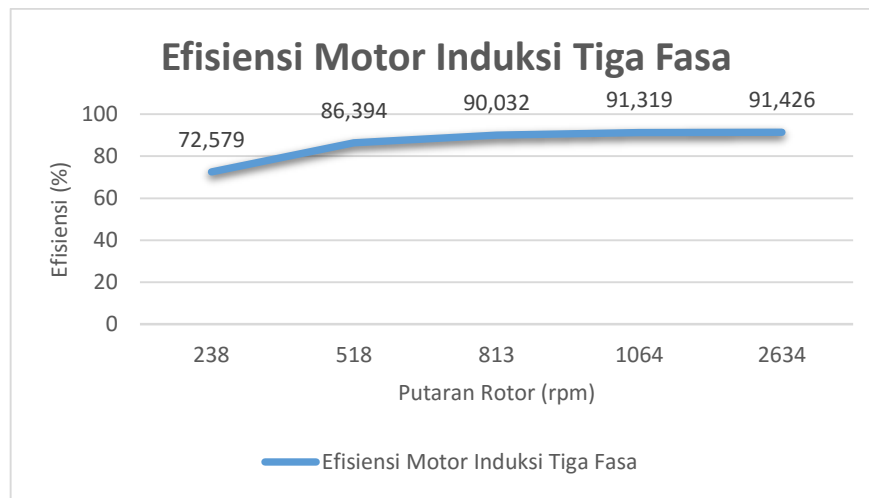
Gambar 4.20 Grafik hubungan arus sumber dengan rugi-rugi tembaga stator

Selain itu, salah satu penyebab rugi-rugi pada motor induksi tiga fasa adalah adanya rugi gesekan yang mana disebabkan karena adanya energi mekanik dari rotor. Berdasarkan data percobaan dari kelima kondisi motor traksi, besarnya rugi-rugi gesekan berbanding lurus dengan putaran rotor. Apabila dibuat suatu grafik maka menghasilkan sebagai berikut:



Gambar 4.21 Grafik hubungan antara putaran rotor dengan rugi gesek

Setelah mengetahui nilai rugi-rugi pada masing-masing bagian di motor induksi tiga fasa, selanjutnya digunakan untuk mengetahui besarnya nilai efisiensi pada mesin motor induksi tiga fasa. Berdasarkan perhitungan diatas, maka besarnya efisiensi pada masing-masing kondisi sebagai berikut:



Gambar 4.22 Grafik efisiensi motor induksi

Berdasarkan pada gambar grafik efisiensi diatas menyatakan bahwa efisiensi motor induksi tiga fasa yang dijadikan sebagai motor traksi mempunyai nilai efisien tertinggi saat putaran 1064 rpm. Pada kondisi tersebut, motor induksi membutuhkan tegangan sebesar 635 Volt dan arus 217, 6 Volt. Hal tersebut berarti bahwa motor akan bekerja dengan baik apabila digunakan pada keadaan tersebut. Selain itu, pada data data pengamatan diatas juga menyatakan bahwa pengoperasian motor dengan menggunakan kecepatan yang rendah akan berdampak pada efisiensi mesin.

4.7 Rugi-rugi dan Efisiensi Sistem Propulsi

Setelah mengetahui nilai rugi-rugi disetiap komponen sistem propulsi, maka dapat diketahui nilai daya keluaran dan efisiensi pada masing-masing komponen tersebut. Oleh karena itu, apabila dibuat suatu tabel sebagai berikut

Tabel 13. Daya keseluruhan komponen sistem propulsi

Daya Input	Pout Penyearah	Pout <i>Inverter</i>	Pout Motor Induksi
448 KW	447,978 KW	430,428 KW	194,764 KW
		430,506 KW	175,096 KW
		428,472 KW	149,605 KW
		399,996 KW	95,147 KW
		392,196 KW	43,47 KW

Oleh karena pada pembahasan ini terdapat dua motor dalam satu *inverter* yang mana setiap motor diasumsikan mempunyai nilai rugi-rugi yang sama. Apabila dibuat suatu tabel rugi-rugi total dari sistem propulsi, sebagai berikut:

Tabel 14. Rugi-rugi keseluruhan komponen sistem propulsi

Daya Input	Prugi Penyearah	Prugi <i>Inverter</i>	Prugi M1	Prugi M2	Total
448 KW	21,6 W	19,992 KW	18,235 KW	18,235 KW	56,484 KW
		20,07 KW	16,644 KW	16,644 KW	53,38 KW
		22,026 KW	16,537 KW	16,537 KW	55,122 KW
		50,502 KW	15,893 KW	15,893 KW	82,31 KW
		58,302 KW	16,423 KW	16,423 KW	91,17 KW

Tabel 15. Efisiensi keseluruhan komponen sistem propulsi

Daya Input	eff Penyearah	eff <i>Inverter</i>	eff M1	eff M2	Total
448 KW	99,99%	95,53%	91,32%	91,32%	94,54%
		95,51%	91,43%	91,43%	94,59%
		95,08%	90,03%	90,03%	93,78%
		88,73%	86,39%	86,39%	90,38%
		87,55%	72,58%	72,58%	83,18%