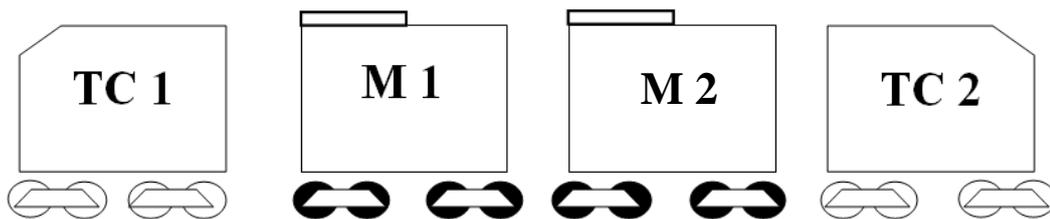


BAB IV

ANALISIS

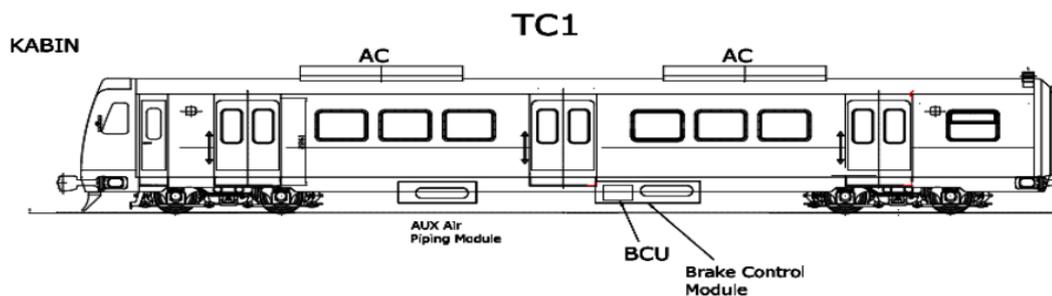
4.1 Spesifikasi KRL



Gambar 18. Satu set KRL

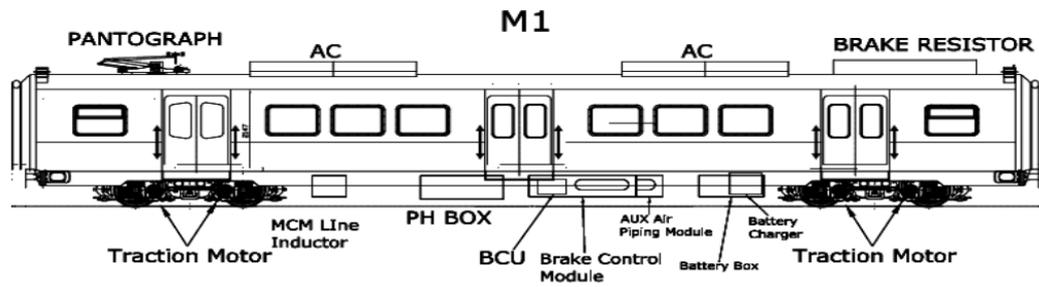
Sumber: Dokumen Inka, Petunjuk Operasi KRL

Gambar diatas merupakan rangkaian satu set KRL, dimana 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. Setiap unit memiliki sistem *propulsi* yang lengkap. Berikut ini merupakan layout setiap gerbong KRL;



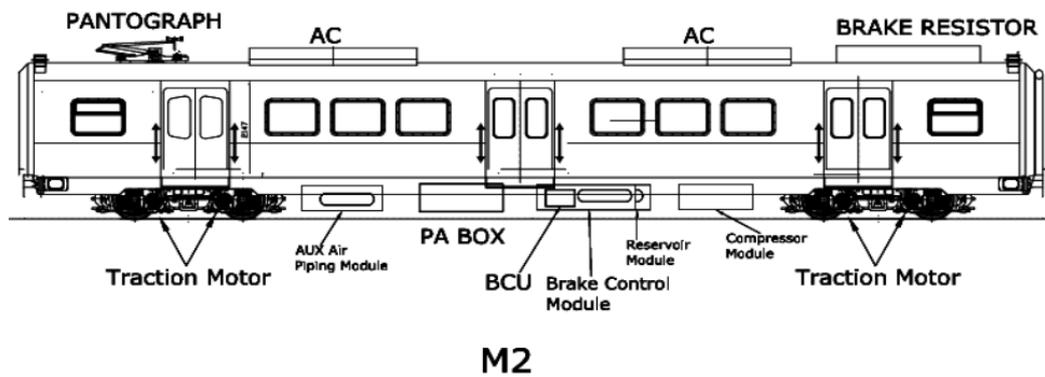
Gambar 19. Layout gerbong TC1

Sumber: Dokumen Inka, Petunjuk Operasi KRL



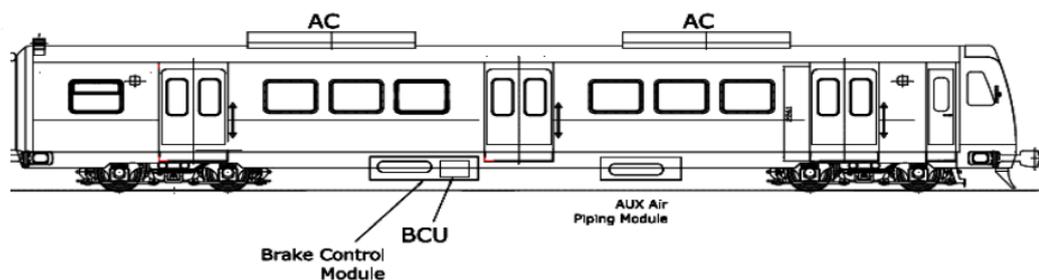
Gambar 20. Layout gerbong M1

Sumber: Dokumen Inka, Petunjuk Operasi KRL



Gambar 21. Layout gerbong M2

Sumber: Dokumen Inka, Petunjuk Operasi KRL



TC2

Gambar 22. Layout gerbong TC2

Sumber: Dokumen Inka, Petunjuk Operasi KRL

Dari layout diatas dapat diketahui bahwa sistem propulsi pada KRL terdapat pada M1 dan M2 yang masing-masing memiliki pantograf dan empat

buah motor traksi AC. Untuk mengontrol kecepatan motor traksi dibutuhkan *inverter*, yang mana satu *inverter* biasanya mengendalikan dua buah motor traksi AC. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan rugi-rugi sistem propulsi M1 dan M2 dimana besarnya rugi-rugi M1 sama dengan M2.

Spesifikasi KRL adalah sebagai berikut;

Tabel 4. Spesifikasi sistem *propulsi* pada 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

4.2 Suplai Daya KRL

Suplay daya pada Kereta Rel Listrik (KRL) diperoleh dari gardu induk PLN 150kV yang diturunkan menjadi jaringan listrik PLN 20kV oleh *transformator step down* 150kV/20kV. Tegangan 20kV tersebut masih diturunkan lagi menjadi 1200VAC oleh *transformator step down* 20kV/1200V, yang kemudian disalurkan ke *rectifier* (penyearah). Penyearah disini berfungsi untuk merubah tegangan 1200VAC menjadi listrik arus searah (DC) dengan tegangan nominal 1500VDC yang disalurkan ke saluran atas (*catenary*) dan diteruskan ke kereta dengan menggunakan pantograf.

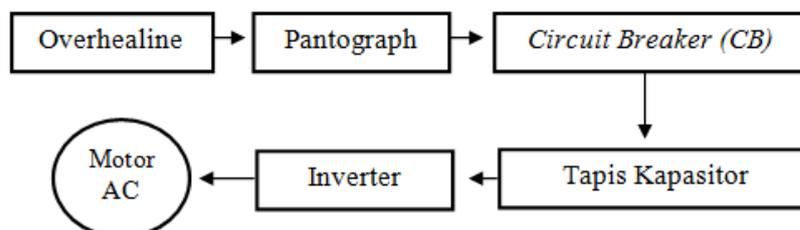
4.3 Sistem Propulsi KRL

Sistem *propulsi* merupakan sistem penggerak pada KRL yang menggunakan motor traksi AC sebagai penggerak utama. Sistem *propulsi* pada KRL terdapat pada M1 dan M2 sehingga terdapat dua unit sistem *propulsi*. Beberapa komponen penyusun sistem *propulsi* pada KRL diantaranya:

1. Pantograf sebagai penyalur aliran listrik dari LAA ke KRL,

2. *Circuit Breaker* (CB) sebagai pemutus aliran listrik apabila terjadi kesalahan atau gangguan,
3. Kapasitor berfungsi sebagai penyimpan energi didalam medan elektrik dengan mengumpulkan ketidakseimbangan energi didalam medan elektrik, serta sebagai tapis guna untuk menekan *noise* pada gelombang tegangan *output* atau memperhalus gelombang tegangan *output*,
4. *Inverter* VVVF IGBT sebagai pengubah listrik DC satu fasa menjadi listrik AC tiga fasa, serta sebagai kontrol kecepatan motor dengan memvariasikan tegangan dan frekuensi. Tegangan *output inverter* bervariasi, sedangkan tegangan *input inverter* bersifat konstan,
6. Motor traksi AC sebagai penggerak, dimana suplai tegangan tiga fasa diperoleh dari *inverter* VVVF IGBT.

Berikut ini merupakan blok diagram sistem *propulsi* pada KRL;

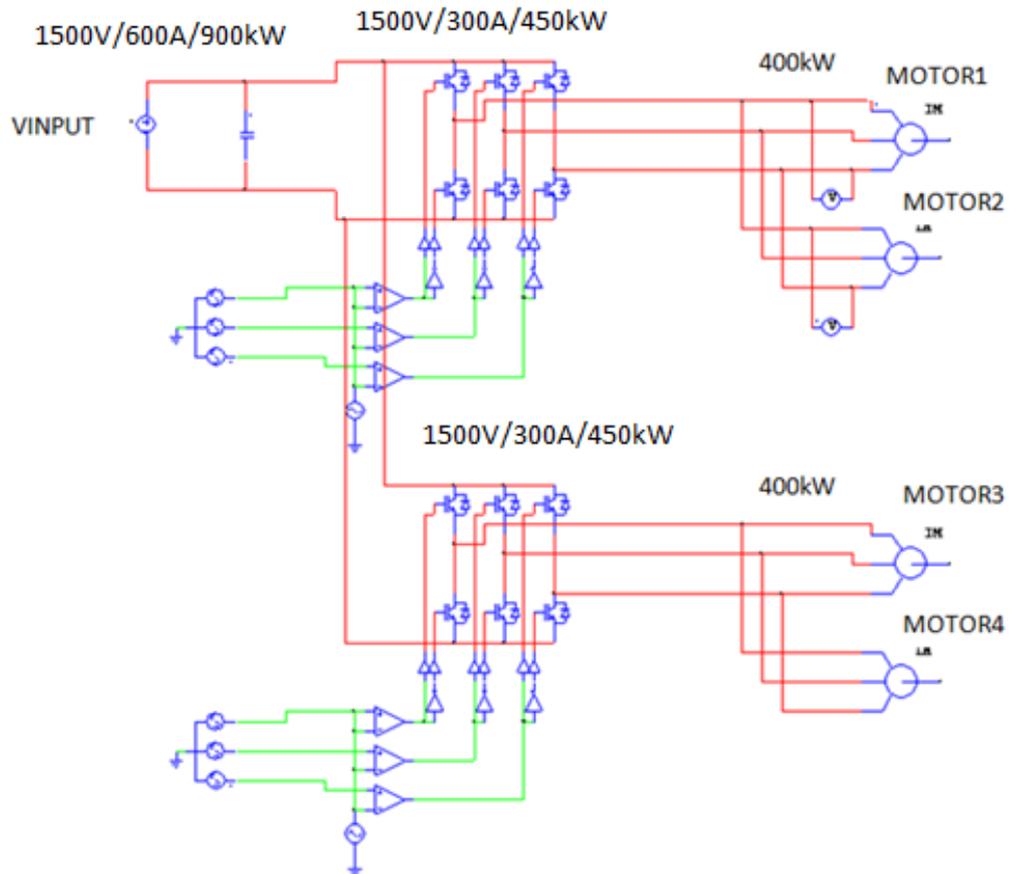


Gambar 23. Blok diagram sistem *propulsi* pada KRL

Sumber : Dokumen pribadi.

Dari blok diagram diatas dapat diketahui bahwa daya *input* KRL diperoleh dari *overheadline* yang disalurkan ke KRL melalui pantograf. Untuk sampai ke motor AC, daya dari pantograf disalurkan ke beberapa komponen sistem *propulsi* yaitu CB, tapis kapasitor dan *inverter*. Komponen sistem *propulsi* memiliki fungsi masing-masing, sebagaimana yang telah dijelaskan pada uraian diatas sehingga memiliki efisiensi yang berbeda-beda. Oleh karena itu, besarnya rugi-rugi daya di setiap komponen tentu saja berbeda.

Pada bab ini, akan dibahas mengenai rugi-rugi dari setiap komponen sistem *propulsi* pada KRL. Rugi-rugi setiap komponen M1 sama dengan M2, karena sistem *propulsi* M1 dan M2 sama. Untuk lebih jelasnya rangkain sistem *propulsi* setiap M pada KRL dapat dilihat pada gambar berikut ini;



Gambar 24. Rangkaian sistem *propulsi* KRL pada masing-masing motor (M)

Sumber : Dokumen pribadi.

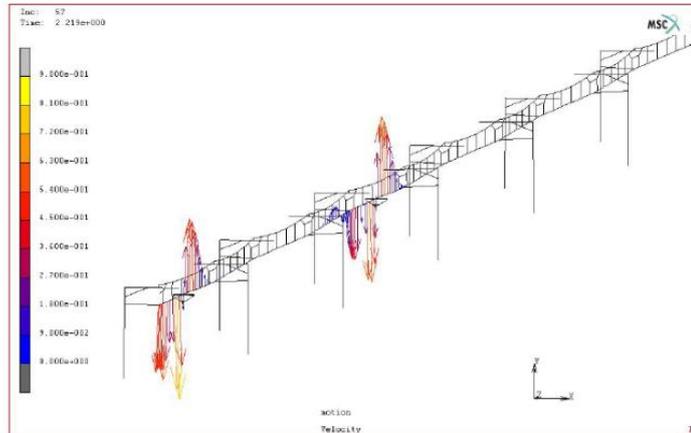
4.3.1 Rugi-rugi pantograf

Pada dasarnya, KRL dapat berjalan apabila menerima pasokan tenaga listrik sebagai sumber energinya. Pasokan energi listrik tersebut diperoleh dari saluran atas atau *catenary* yang disalurkan melalui pantograf. Tenaga tersebut diperoleh dari kontak geser antara *slide* pantograf dengan kabel kontak. Ketika pantograf melewati *catenary*, terjadi interaksi yang dinamis antara pantograf dengan *catenary*. Seiring bertambahnya kecepatan, getaran yang ditimbulkan oleh pantograf dan *catenary* semakin besar sehingga mengakibatkan pantograf meluncur jauh dari kabel kontak dan dapat menimbulkan busur dan percikan api.

Busur dan percikan api sangat berpengaruh pada besarnya tegangan yang disalurkan untuk mendukung unjuk kerja sistem *propulsi* KRL sendiri. Selain itu, juga dapat mengakibatkan KRL menjadi kehilangan kontak secara langsung yang akan menimbulkan gangguan pada catu daya yang dapat mengganggu pada sistem traksi KRL.

Mengenai analisis rugi-rugi pantograf, penulis tidak melakukan penelitian secara langsung dan mendalam. Melainkan, penulis hanya mengkaji rugi-rugi pantograf dari jurnal terkait. Jurnal dengan judul "*Harmonic Loss Analysis of Traction Transformer of High-Speed Trains Considering Pantograf-OCS Electrical Contact Properties*". Merupakan jurnal dari *School of Electrical Engineering, Beijing Jiatong University, Beijing, China* yang disusun oleh Jin Wang, Zhongping Yang, Fei Lin dan Junci Cao. Penelitian tersebut menggunakan sistem *pantograph-catenary* yang dibuat dengan menggunakan perangkat lunak MSC.

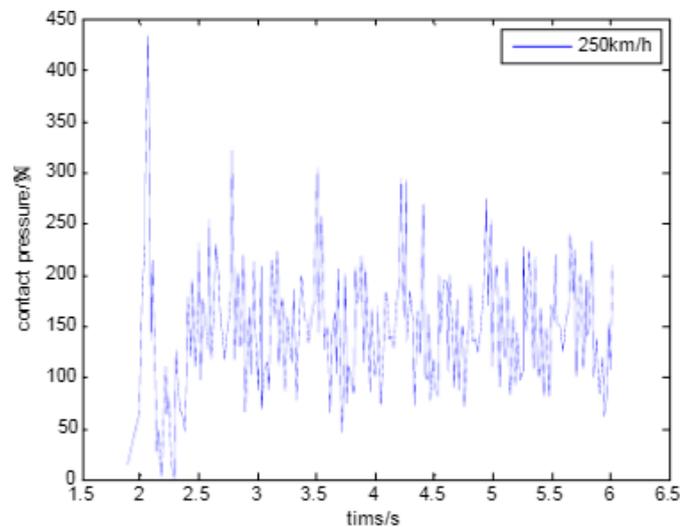
Kabel kontak dan pantograf tidak terhubung secara langsung, melainkan keduanya akan terhubung dan saling berinteraksi ketika KRL bergerak. Pantograf dengan *catenary* dihubungkan oleh gaya angkat dan tekanan kontak, sehingga hubungan antara pantograf dengan *catenary* dapat menimbulkan rugi-rugi daya. Pada penelitian tersebut dilakukan penelitian tentang rugi-rugi pada pantograf dengan menggunakan model pantograf dan *catenary* sebagai berikut;



Gambar 25. Model pantograf dan *catenary*

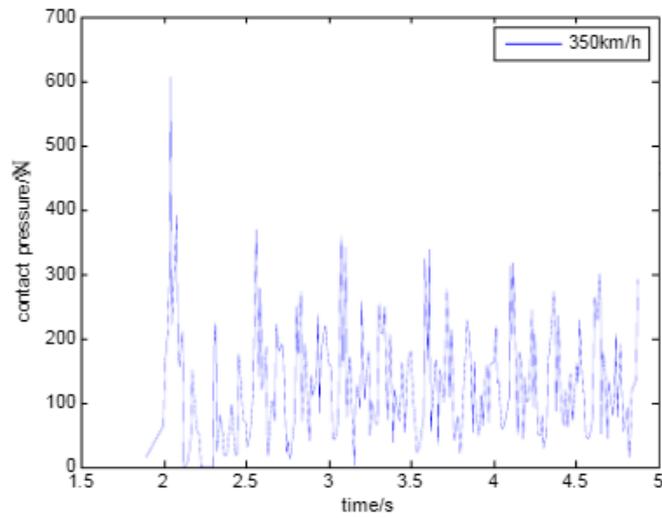
Sumber: Jin Wang, Zhongping Yang, Fei Lin dan Junci Cao,
Harmonic Loss Analysis of Traction Transformer of High-Speed Trains Considering Pantograf-OCS Electrical Contact Properties.

Didalam penelitian tersebut dipaparkan rugi-rugi pantograf dengan empat kondisi kecepatan KRL yaitu 250 km/h, 350 km/h, 400 km/h dan 450 km/h dan diperoleh gelombang keluaran sebagai berikut;



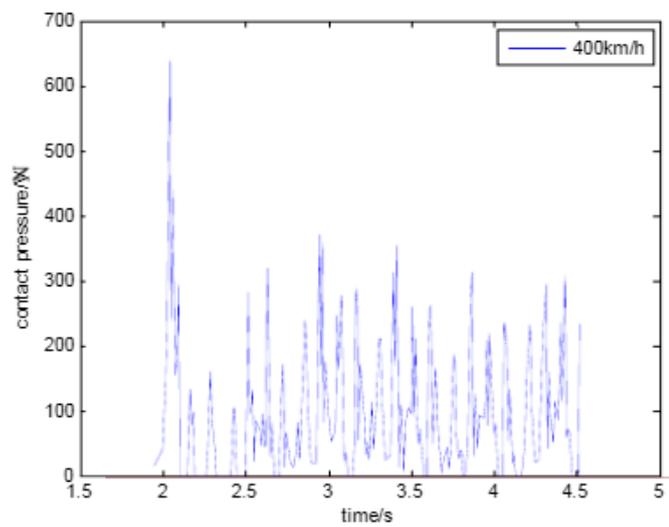
Gambar 26. Kecepatan 250 km/h

Sumber: Jin Wang, Zhongping Yang, Fei Lin dan Junci Cao,
Harmonic Loss Analysis of Traction Transformer of High-Speed Trains Considering Pantograf-OCS Electrical Contact Properties.



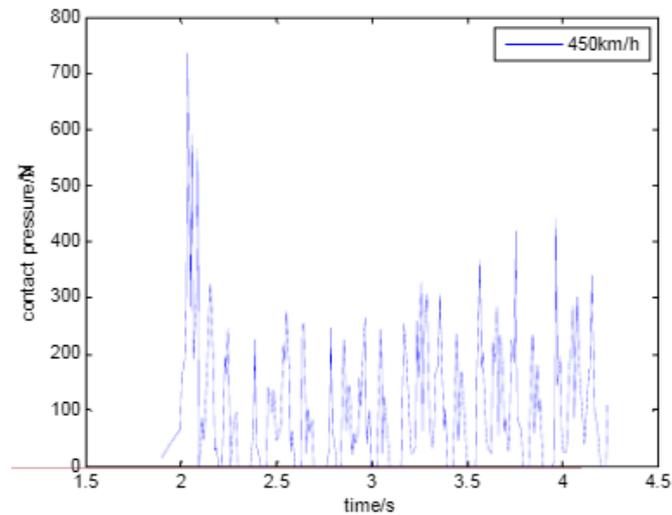
Gambar 27. Kecepatan 350 km/h

Sumber: Jin Wang, Zhongping Yang, Fei Lin dan Junci Cao,
Harmonic Loss Analysis of Traction Transformer of High-Speed Trains Considering Pantograf-OCS Electrical Contact Properties.



Gambar 28. Kecepatan 4000 km/h

Sumber: Jin Wang, Zhongping Yang, Fei Lin dan Junci Cao,
Harmonic Loss Analysis of Traction Transformer of High-Speed Trains Considering Pantograf-OCS Electrical Contact Properties.



Gambar 29. Kecepatan 450 km/h

Sumber: Jin Wang, Zhongping Yang, Fei Lin dan Junci Cao,
Harmonic Loss Analysis of Traction Transformer of High-Speed Trains Considering Pantograf-OCS Electrical Contact Properties.

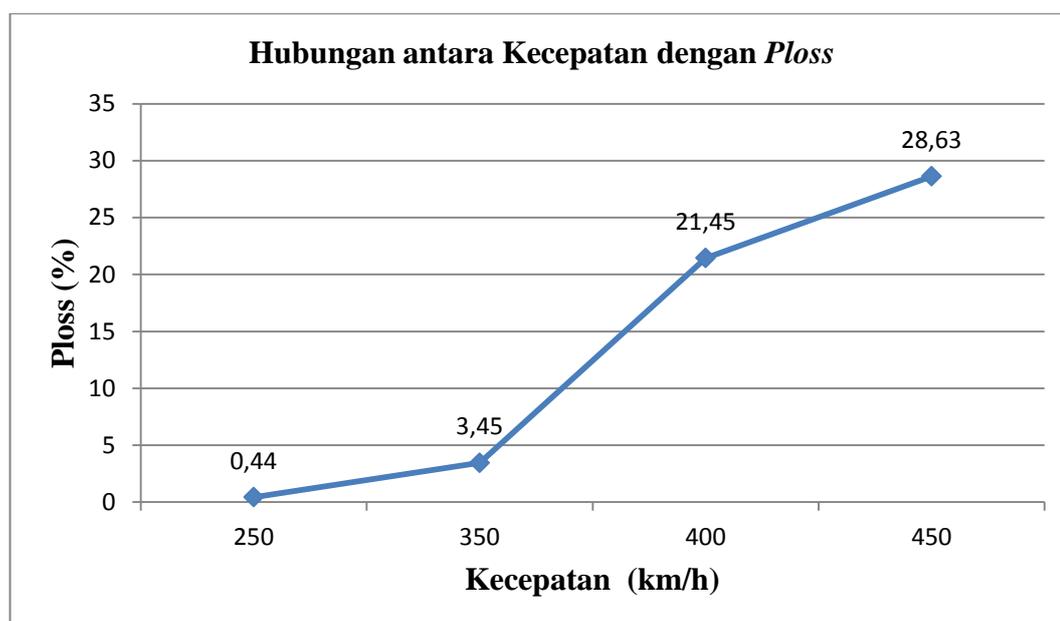
Dari keempat kondisi kecepatan yang berbeda, diperoleh hasil rugi-rugi yang berbeda, sebagaimana yang ditampilkan pada tabel 5 dibawah ini. Dimana, total waktu merupakan keseluruhan waktu (t_{total}) simulasi kecuali untuk waktu pantograf meningkat. *Disconnection time* (t_{loss}) merupakan jumlah waktu disetiap pemutusan dengan gaya tekan 0N. t_{total} minus t_{loss} merupakan *contact time* ($t_{contact}$). Tekanan kontak lebih besar dari 0N selama terhubung kontak. Oleh karena itu, rasio potongan pemutusan dapat dinyatakan sebagai p_{loss} ($p_{loss}=t_{loss}$ dibagi dengan t_{total}).

Keempat bentuk gelombang tersebut dapat diketahui bahwa jumlah titik dengan kurva tekanan kontak yang menyamai 0 meningkat dengan kecepatan yang meningkat, yang menunjukkan bahwa jumlah pemutusan tidak lebih besar dari 5%. Pada tabel ditunjukkan bahwa p_{loss} kurang dari 5% pada kecepatan dibawah 350km/h dan dengan rasio pemutusan lebih besar dari 20% pada kecepatan 40km/h. Rasio pemutusan 20% harus hindari.

Tabel 5. Hubungan kecepatan dengan *ploss*

Kecepatan (km/h)	<i>Tloss</i> (s)	<i>Tcontact</i> (s)	<i>Ttotal</i> (s)	<i>Ratio of disconnection ploss (%)</i>
250	0.018	4,112	4,13	0,44
350	0.1029	2,8771	2,98	3,45
400	0,5513	2,0187	2,57	21,45
450	0,67	1.67	2,34	28,63

Dari tabel 5 dapat diketahui bahwa semakin kencang KRL melaju maka *ploss* yang dihasilkan akan semakin besar. Dengan kata lain, besarnya kecepatan KRL berbanding lurus dengan besarnya *ploss*. Hubungan keduanya dapat digambarkan pada grafik berikut ini;

**Gambar 30.** Hubungan antara kecepatan dengan *ploss*

Sumber: Dokumen pribadi

Rugi-rugi pantograf merupakan rugi mekanik karena berkaitan dengan kecepatan laju kereta, sehingga penulis tidak memasukkan besarnya rugi-rugi pantograf pada penelitian ini.

4.3.2 Rugi-rugi pada Circuit Breaker (CB)

Circuit Breaker (CB) merupakan salah satu komponen proteksi pada sistem tenaga listrik, dimana komponen ini berupa saklar atau *switching* mekanis yang mampu membuka dan menutup atau menghubungkan dan memutuskan aliran listrik. CB akan memutus aliran arus listrik ketika terjadi gangguan atau *abnormal* seperti *short circuit*. CB juga sering disebut dengan Pemutus Tenaga (PMT).

CB berperan penting dalam suatu saluran sistem tenaga listrik karena dapat melindungi sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan pada sistem tersebut, dimana terjadinya gangguan dapat menimbulkan beberapa efek seperti efek *termis*, efek *magnetis* dan dinamis *stability*.

Perannya sebagai saklar penghubung dan pemutus, maka CB ini memiliki rugi-rugi daya yang dapat diketahui setelah melakukan pengukuran karena berhubungan dengan rugi mekanik. Oleh karena itu penulis tidak memasukkan rugi-rugi CB pada penelitian ini.

4.3.3 Rugi-rugi pada Kapasitor

Kapasitor merupakan komponen elektronika yang berfungsi untuk menyimpan dan melepaskan energi listrik. Kapasitor terdiri dua buah lempengan logam yang sejajar dan dipisahkan oleh dielektrik dimana bahan dielektrik ini dapat mempengaruhi besarnya nilai kapasitansi pada kapasitor. Kapasitansi kapasitor yaitu kondisi kapasitor ketika sedang melakukan pengisian atau penyimpanan.

Kapasitor pada rangkaian sistem *propulsi* KRL berperan sebagai rangkaian *filter* atau tapis yang berfungsi untuk menekan tegangan riak atau *ripple*. Dengan menekan *ripple* maka gelombang keluaran yang dihasilkan lebih halus. Seperti halnya pada rangkaian diatas, dimana tegangan *inputnya* berupa DC maka dengan tapis kapasitor ini tegangan *output* yang sejatinya searah dapat dipertahankan, karena tegangan riak dapat meloloskan komponen searah dan mencegah komponen bolak-balik.

Hal tersebut dapat terjadi karena kapasitor akan menyimpan tegangan pada saat tegangan sumber naik. Dimana, pada saat tegangan sumber naik kapasitor akan terisi hingga mencapai tegangan maksimal. Sementara, ketika sumber tegangan menurun, kapasitor akan melepaskan energi yang disimpan ke beban.

Perancangan *filter* kapasitor cukuplah mudah yaitu hanya dengan menghubungkan kapasitor dengan beban secara paralel. Besarnya daya sebelum dan sesudah melewati kapasitor berbeda, karena dengan menggunakan *filter* kapasitor terdapat rugi-rugi daya. Rugi-rugi daya *filter* kapasitor berhubungan dengan rugi mekanik sehingga penulis tidak memasukkan rugi-rugi *filter* kapasitor pada penelitian ini.

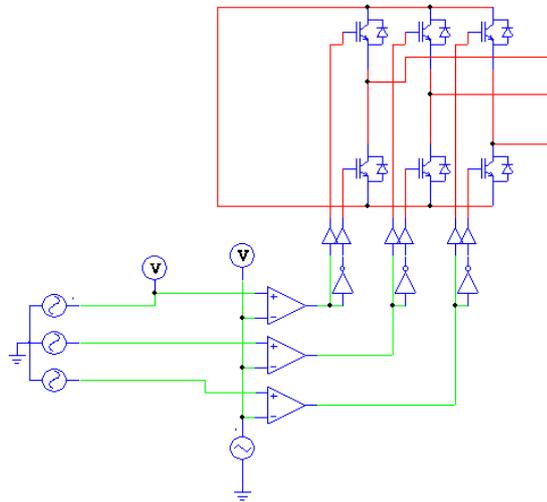
4.3.4 Rugi-rugi Inverter VVVF IGBT

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. Untuk memperoleh tegangan dan frekuensi sesuai dengan keinginan, tegangan DC atau tegangan *input* dicacah oleh frekuensi *carrier*. Tegangan *output inverter* digunakan untuk mensuplai motor traksi. Besarnya tegangan *output inverter* dipengaruhi oleh besarnya tegangan *input* dan tegangan PWM yang merupakan hasil dari modulasi antara sinyal *carrier* dengan sinyal referensi.

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. Berikut ini merupakan rangkaian *inverter* VVVF IGBT tiga fasa;



Gambar 31. Rangkaian *inverter* tiga fasa dengan kontrol PWM

Sumber: Dokumen pribadi

Untuk mengetahui besarnya rugi-rugi pada *inverter*, dilakukan perhitungan dengan lima kondisi, kondisi tersebut diperoleh dari hasil pengujian motor. Seperti yang sudah dijelaskan diatas, bahwa *inverter* tersebut tersusun atas enam buah IGBT yang mana di dalam IGBT tersebut terdapat dioda yang masing-masing disusun secara paralel terhadap dioda yang lainnya. Sehingga rugi-rugi pada *inverter* tersebut dipengaruhi oleh rugi-rugi yang terdapat pada IGBT dan dioda.

4.3.4.1 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 konduktasi dapat dicari dengan mengalikan

antara *collector* satu rasi, arus *collector* dan *duty cycle* (D), dimana pada persamaan diketahui bahwa untuk mencari D dengan persamaan berikut ini;

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

Sedangkan rugi-rugi *switching* merupakan rugi-rugi yang tergantung pada tegangan, arus yang mengalir dan *switching time* dari *switch* tersebut. Rugi-rugi *switching* terbagi menjadi dua yaitu ketika *switching on* dan *switching off*. Ketika *switching on*, besarnya rugi-rugi tergantung pada arus dan tegangan yang melewati *switch* tersebut. Berbeda dengan rugi-rugi *switching off*, ketika *switching off* besarnya rugi-rugi lebih kecil daripada *switching on*, bahkan tidak perlu diperhitungkan. Hal tersebut diarenakan rugi-rugi yang muncul relatif sedikit karena arus bocor yang mengalir pada *switch* sedikit. Akan tetapi, pada penelitian ini dilakukan perhitungan rugi-rugi *switching off*.

Inverter menggunakan HiPak IGBT 5SNA 1500E330305 dengan V_{CE} sebesar 3300V dan I_C 1500A. Berikut ini merupakan perhitungan besarnya daya *on* (E_{on}) dan daya *off* (E_{off}) yang digunakan untuk mencari besarnya rugi-rugi pada *inverter* dengan lima kondisi;

Tabel 6. Parameter perhitungan daya *on* dan daya *off*

Daerah kerja	Nilai
V_{geon}	15V
R_{gon}	1 Ω
V_{geoff}	15V
R_{geoff}	1,5 Ω

Daya *switching on*,

$$E_{on} = \frac{V_{ge}^2}{R_{gon}}$$

$$E_{on} = \frac{15^2 V}{1\Omega}$$

$$E_{on} = 225W$$

Daya *switching off*,

$$E_{off} = \frac{V_{ge}^2}{R_{gon}}$$

$$E_{off} = \frac{15^2 V}{1,5 \Omega}$$

$$E_{off} = 150 W$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh besarnya *switching on* sebesar 225W dan *switching off* sebesar 150W. Untuk mencari besarnya *duty cycle*, harus dilakukan pengaturan besarnya tegangan referensi, tegangan *carrier*, frekuensi referensi dan frekuensi *carrier* pada kontrol PWM. Pengaturan tersebut mengacu pada penggunaan PWM analog, dimana ketika tegangan referensi lebih kecil dari pada tegangan *carrier* maka tegangan *output* AC yang dihasilkan akan lebih kecil dari tegangan *input* DC, begitu pula sebaliknya ketika tegangan referensi lebih besar dari pada tegangan *carrier*, maka tegangan *output* AC yang dihasilkan lebih besar dari tegangan *input* DC. Berikut ini merupakan pengaturan tegangan referensi dan tegangan *carrier* dengan nilai tegangan *output* yang lebih kecil daripada tegangan *input* DC.

1. Tegangan *output* 160,5 V

Untuk menghasilkan tegangan *output* AC 551V, amplitudo sinyal referensi sebesar 0.0505V dengan frekuensi 20Hz. Sedangkan amplitudo sinyal *carrier* sebesar 4 Vpp dengan frekuensi 200Hz. Masing-masing fasa pada sinyal referensi berbeda 120°.

2. Tegangan *output* 321V

Untuk menghasilkan tegangan *output* AC 435V, amplitudo sinyal referensi sebesar 0.198V dengan frekuensi 20Hz. Sedangkan amplitudo sinyal *carrier* sebesar 4 Vpp dengan frekuensi 200Hz. Masing-masing fasa pada sinyal referensi berbeda 120°.

3. Tegangan *output* 493,9 V

Untuk menghasilkan tegangan *output* AC 335V, amplitudo sinyal referensi sebesar 0.475V dengan frekuensi 20Hz. Sedangkan amplitudo sinyal *carrier* sebesar 4 Vpp dengan frekuensi 200 Hz. Masing-masing fasa pada sinyal referensi berbeda 120°.

4. Tegangan *output* 635 V

Untuk menghasilkan tegangan *output* AC 635 V, amplitudo sinyal referensi sebesar 0.793V dengan frekuensi 20Hz. Sedangkan amplitudo sinyal *carrier* sebesar 4 Vpp dengan frekuensi 200 Hz. Masing-masing fasa pada sinyal referensi berbeda 120°.

5. Tegangan *output* 645V

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°.

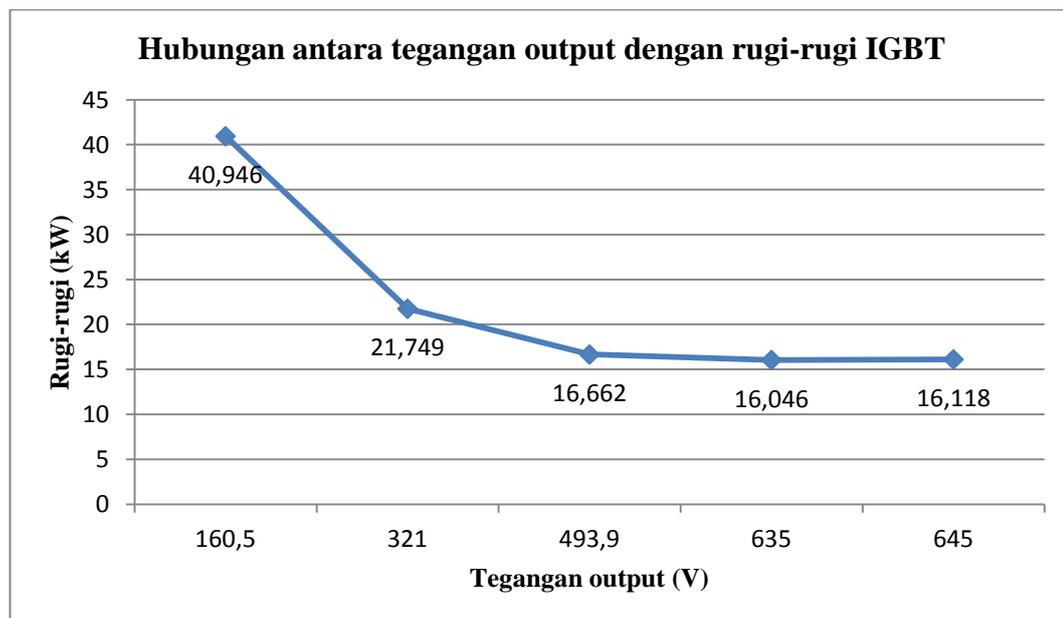
Dengan besarnya tegangan keluaran diatas, maka diperoleh hasil rugi-rugi IGBT pada keadaan satu rasi dengan suhu tertinggi 150°C, sebagai berikut; (untuk perhitungannya dapat dilihat pada lampiran halaman 77 s.d 91)

Tabel 7. Rugi-rugi pada IGBT

Vref (V)	Vcarrier (V)	Voutput (V)	Pinput (kW)	Rugi-rugi (kW)	Poutput (kW)	Efisiensi (%)
0,0505	4	160,5	450	40,946	409,054	90,90
0,198	4	321	450	21,749	428,251	95,17
0,475	4	493,9	450	16,662	433,338	96,3
0,793	4	635	450	16,046	433,954	96,43
0,8222	4	645	450	16,118	433,882	96,42

Dari tabel hasil pengamatan rugi-rugi IGBT, daya *input* dan daya *output* pada lima kondisi *inverter* diperoleh efisiensi yang sangat besar yakni diatas 90%. Berdasarkan data dari *Fuji Electric Journal* menyatakan bahwa untuk kendaraan listrik, dimana motor yang berperan sebagai penggerak dan pembangkit listrik dapat memperhitungkan proporsi kendaraan yang lebih tinggi yakni dengan meminimalisir rugi-rugi. Untuk meminimalisir rugi-rugi tersebut, Fuji Electric telah mengembangkan IGBT yang memiliki tegangan tahan 650V dengan kerugian yang lebih rendah.

Besarnya rugi-rugi berbanding terbalik dengan nilai tegangan *output* yang diinginkan, dengan kata lain semakin besar tegangan *output* maka besarnya rugi-rugi akan semakin kecil. Hal tersebut sesuai dengan persamaan $P=I^2R$. Berikut ini merupakan grafik hubungan antara tegangan *output* dengan rugi-rugi IGBT;



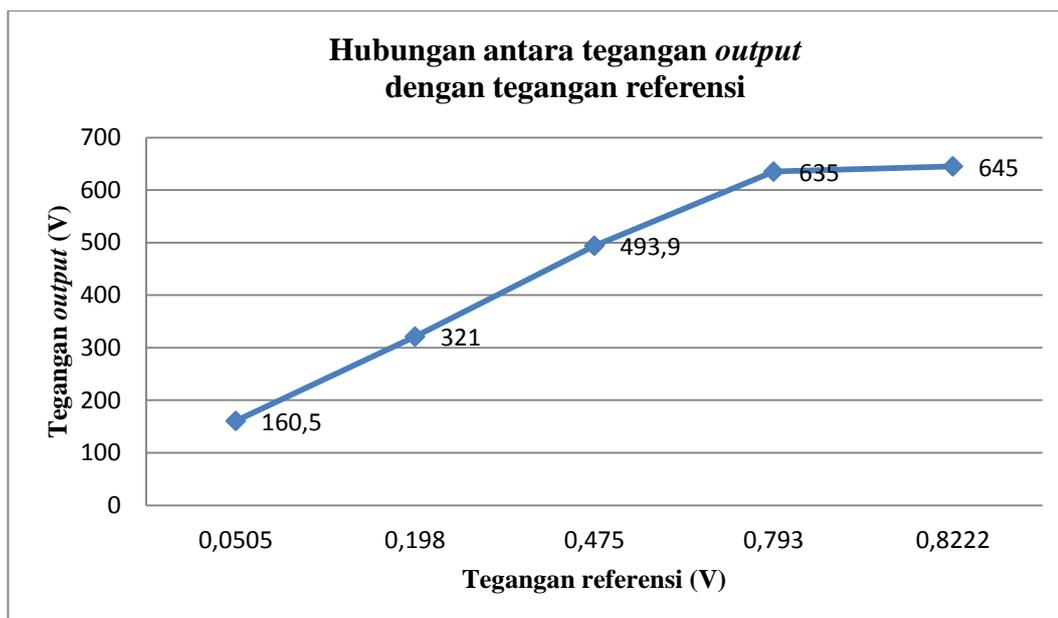
Gambar 32. Grafik hubungan antara tegangan *output* dengan rugi-rugi

Sumber: Dokumen pribadi

Besarnya tegangan *output* dipengaruhi oleh tegangan referensi, tegangan *carrier*, frekuensi referensi dan frekuensi *carrier*. Pada perhitungan ini besarnya tegangan *carrier* dan frekuensi *carrier* adalah sama di setiap percobaan yaitu 4V dan 200Hz. Frekuensi *carrier* atau frekuensi pembawa berfungsi sebagai

frekuensi *switching* pada IGBT. Sementara, pada pengontrolannya dilakukan perubahan pada tegangan referensi.

Dari tabel hasil perhitungan dapat diketahui bahwa semakin besar tegangan referensi maka tegangan *output* yang dihasilkan juga semakin besar. Penggunaan besarnya tegangan referensi ini didasarkan pada kontrol PWM, dimana pada rangkaian PWM terdapat *comparator*, ketika tegangan referensi lebih besar dari tegangan *carrier*, maka tegangan *output* AC yang dihasilkan akan bernilai lebih tinggi dari tegangan *input* DC, sedangkan apabila tegangan referensi lebih kecil dari tegangan *carrier* maka tegangan *output* AC yang dihasilkan akan bernilai lebih rendah dari tegangan *input* DC. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada grafik hubungan antara tegangan referensi dengan tegangan *output*. Berikut merupakan grafik hubungan antara keduanya;



Gambar 33. Grafik hubungan antara tegangan *output* dengan tegangan referensi

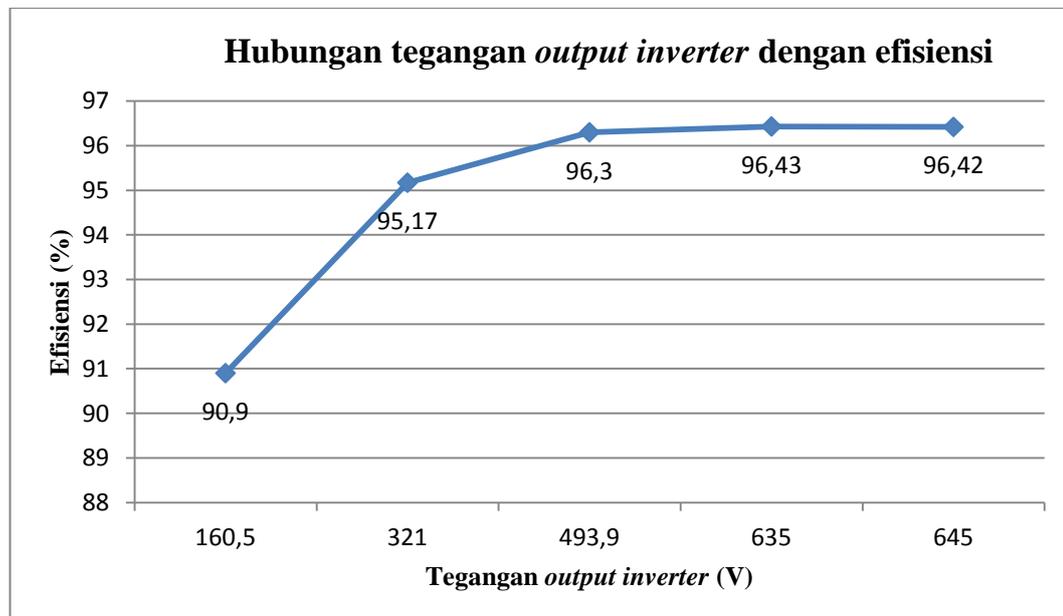
Sumber: Dokumen pribadi

Besarnya tegangan *output* tersebut juga berpengaruh pada besarnya efisiensi. Efisiensi tertinggi terdapat pada tegangan *output* 645V yaitu 96,42% dengan rugi-rugi sebesar 16,118kW, sedangkan efisiensi terendah terdapat pada tegangan *output* 160,05V yaitu 90,90% dengan rugi-rugi sebesar 40,946 kW. Dari kondisi satu sampai kondisi ke lima, dapat diketahui bahwa besarnya tegangan *output* berbanding lurus dengan efisiensi. Semakin besar tegangan maka arus yang

mengalir akan semakin kecil sehingga besarnya daya akan kecil, sesuai dengan persamaan $P=I^2R$. Begitupula sebaliknya, ketika tegangan kecil maka arus yang mengalir akan semakin besar sehingga besarnya daya besar. Dengan persamaan $P=I^2R$, dimana arus yang digunakan ialah hasil kuadrat arus, sehingga untuk arus yang bernilai besar, arus yang mengalir juga akan semakin besar.

Pada rugi-rugi *switching*, arus *peak* atau arus puncak (I_{pk}) sangat mempengaruhi. I_{pk} merupakan arus terbesar dari setiap kejadian, pada penelitian kali ini arus puncak diperoleh dari hasil pembagian antara daya *input* dengan tegangan *output* AC $\left(I_{pk} = \frac{P_{in}}{V_{out}} \right)$. Besarnya nilai yang diperoleh dalam keadaan tiga fasa, sehingga untuk menjadikan nilai arus tersebut agar bernilai satu fasa, nilai arus dibagi tiga $\left(I_{pk} = \frac{I_{pk}}{3} \right)$. Arus tiap fasa diasumsikan besarnya sama, karena tidak ada pengukuran secara langsung baik melalui simulasi maupun secara fisik.

Berikut ini merupakan grafik hubungan antara tegangan *output* dengan efisiensi;



Gambar 34. Grafik hubungan tegangan *output* inverter dengan efisiensi IGBT

Sumber: Dokumen pribadi

4.3.4.2 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*. Dua kondisi tersebut menimbulkan rugi-rugi yang disebut dengan rugi konduksi dan rugi *reverse recovery*. Berikut ini merupakan hasil perhitungan rugi-rugi pada dioda; (untuk perhitungannya dapat dilihat pada lampiran halaman 92 s.d 96)

Tabel 8. Hasil perhitungan rugi-rugi dioda

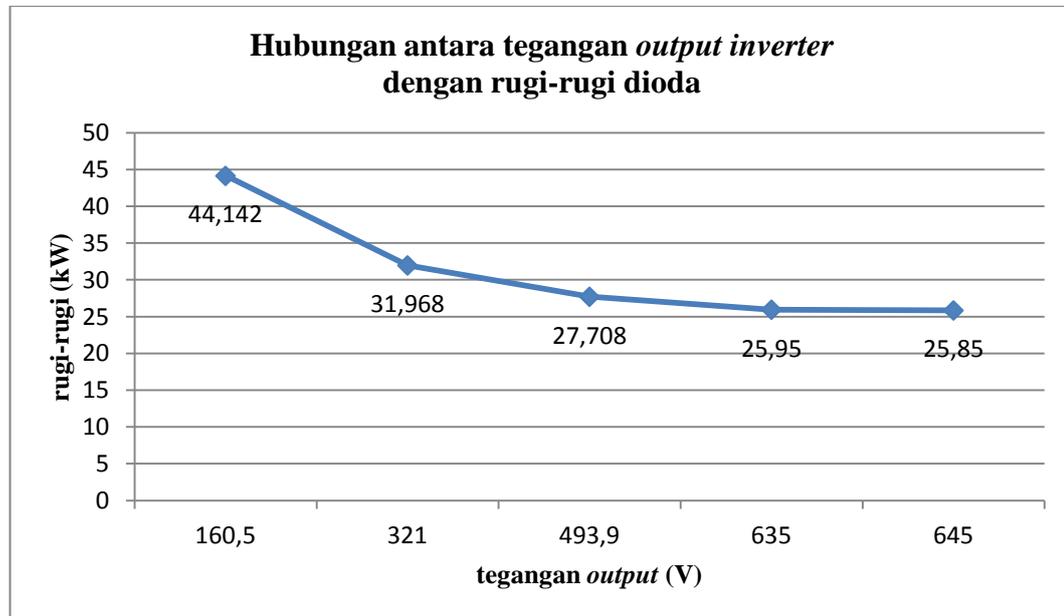
Vout (V)	Pkonduktansi (kW)	Prec.dioda (kW)	Prugi.total (kW)
160,5	3,3	4,057	44,142
321	3,3	2,028	31,968
493,9	3,3	1,318	27,708
635	3,3	1,025	25,95
645	3,3	1,009	25,85

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa semakin besar tegangan *output* maka rugi-rugi yang terdapat pada dioda akan semakin kecil. Hal tersebut dikarenakan, besarnya tegangan berbanding terbalik dengan arus, sehingga ketika tegangan yang mengalir memiliki nilai yang kecil, maka arus yang mengalir relatif besar.

Besarnya arus yang mengalir dapat mempengaruhi besarnya nilai daya. Besarnya arus yang mengalir berbanding lurus dengan besarnya daya, hal tersebut sesuai dengan persamaan $P=I^2R$. Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa besarnya arus yang mengalir dikuadratkan.

Dengan besarnya nilai arus yang dikuadratkan, jika arus yang mengalir sudah memiliki nilai yang besar, ketika dikuadratkan akan menghasilkan nilai yang besar. Arus yang besar tersebut kemudian akan mempengaruhi besarnya daya pada suatu penghantar.

Berikut ini merupakan grafik hubungan antara tegangan *output* dengan rugi-rugi dioda;



Gambar 35. Grafik hubungan antara tegangan output inverter dengan rugi-rugi dioda

Sumber: Dokumen pribadi

4.3.4.3 Total rugi-rugi Inverter VVVF IGBT

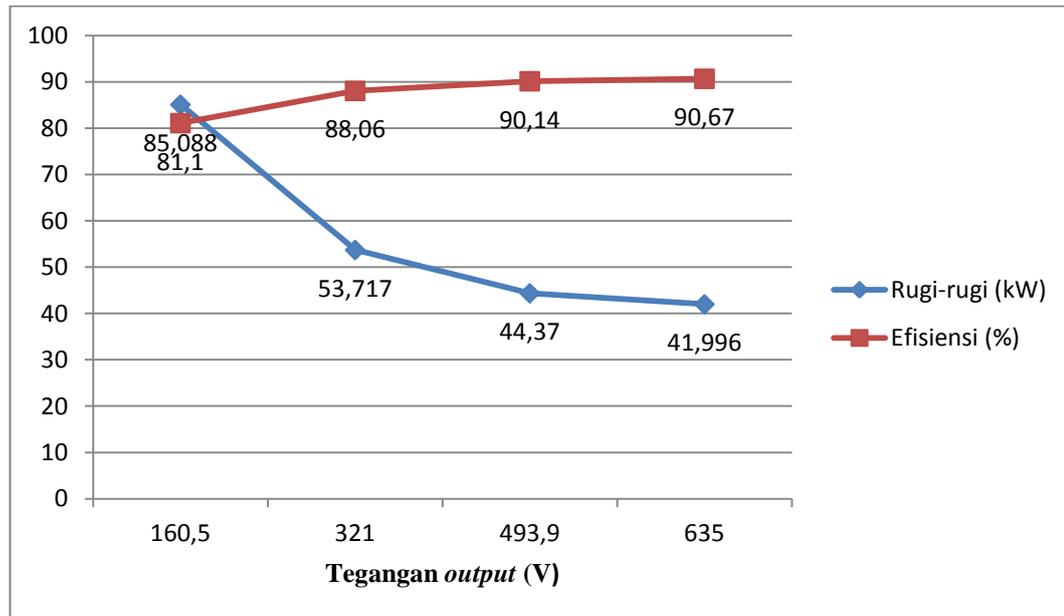
(untuk perhitungannya dapat dilihat pada lampiran halaman 97 s.d 100)

Tabel 9. Hasil perhitungan rugi-rugi *inverter* VVVF IGBT

Tegangan Output (V)	Pinput inverter (kW)	Prugi IGBT (kW)	Prugi Dioda (kW)	Prugi total (kW)	Pout (kW)	Efisiensi (%)
160,5	450	40,946	44,142	85,088	364,912	81,1
321	450	21,749	31,968	53,717	396,283	88,06
493	450	16,662	27,708	44,37	405,63	90,14
635	450	16,046	25,95	41,996	408,004	90,67
645	450	16,118	25,85	41,968	408,032	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 persamaan $P=I^2R$ besarnya arus yang mengalir dikuadratkan. Berikut merupakan grafik hubungan antara tegangan output dengan rugi-rugi dan efisiensi *inverter* VVVF IGBT;



Gambar 36. Grafik hubungan antara tegangan *output inverter* dengan rugi-rugi dan efisiensi *inverter* VVVF IGBT

Sumber: Dokumen pribadi

4.3.5 Rugi-rugi Motor Traksi AC Tiga Fasa

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. 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 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. Akan tetapi, dengan hasil yang berbeda tersebut, dapat diketahui bagaimana hubungan antara parameter satu dengan parameter yang lainnya. Seperti hubungan tegangan *input* dengan efisiensi motor, medan putar stator, putaran rotor dan slip.

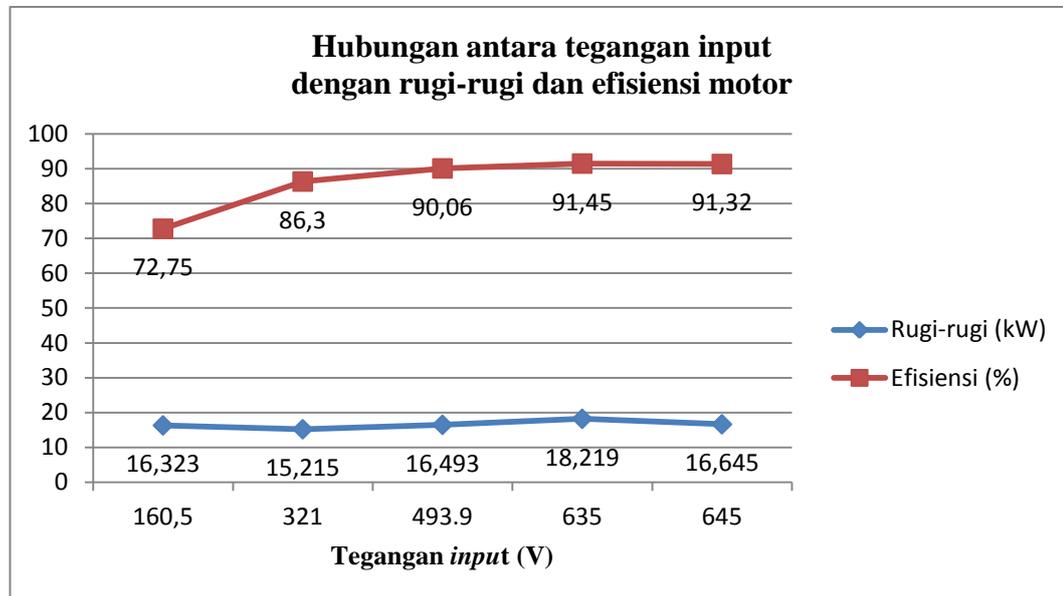
(untuk perhitungannya dapat dilihat pada lampiran halaman 101 s.d 120)

Tabel 10. Hasil pengujian lima kondisi motor traksi

Kondisi ke-	Tegangan (V)	Arus (A)	Pin (kW)	Prugi (kW)	Pout (kW)	Efisiensi (%)
1	160,5	247,64	59,893	16,323	43,570	72,75
2	321	224,4	111,04	15,215	95,825	86,30
3	493.9	217,9	165,9	16,493	149,407	90,06
4	635	217,6	213	18,219	194,781	91,45
5	645	197,28	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 37. Grafik hubungan antara tegangan *input* dengan rugi-rugi dan efisiensi motor

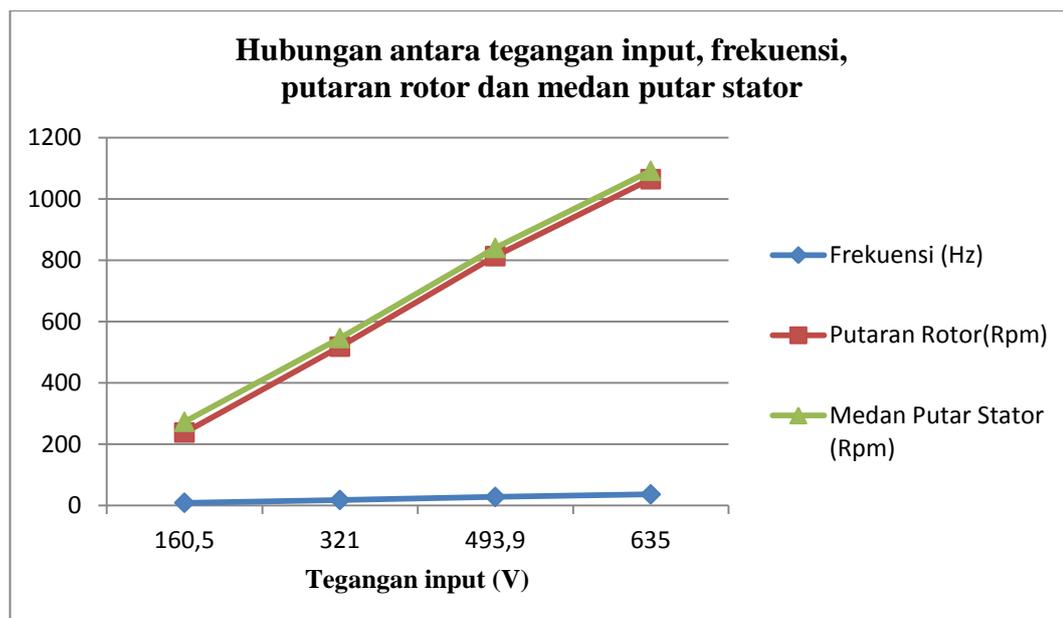
Sumber: Dokumen pribadi

Dari grafik diatas, performa motor dengan efisiensi tertinggi dengan tegangan *input* 635V dengan besarnya daya *input* 213kW dan daya *output* 194,781kW sehingga diperoleh rugi-rugi sebesar 18,219 kW serta efisiensi sebesar 91,45%. Untuk lebih jelasnya, berikut ini merupakan tabel hasil perhitungan rugi-rugi yang terdapat pada kelima kondisi pengujian motor induksi; (untuk perhitungannya dapat dilihat pada lampiran halaman 101 s.d 120)

Tabel 11. Hasil perhitungan rugi-rugi pada lima kondisi motor traksi

Vin (V)	f (Hz)	Slip	Medan Putar Stator (Rpm)	Putaran Rotor (Rpm)	Rugi Stator (kW)	Rugi Rotor (kW)	Rugi Gesekan (kW)	Rugi Stray (kW)
160,5	9,1	0,128	273	238	9,139	6,497	0,0238	0,663
321	18,2	0,051	546	518	8,428	5,233	0,095	1,459
493,9	28	0,032	840	813	8985	5,021	0,227	2,26
635	36,38	0,025	1091,4	1064	9,8	5,08	0,373	2,966
645	90	0,024	2700	2634	7,219	4,429	2,33	2,67

Dari tabel 11, dengan besarnya tegangan *input* dan frekuensi yang sebanding dengan mengalami peningkatan disetiap pengujiannya, maka dapat diketahui bahwa semakin besar tegangan input maka menghasilkan putaran yang lebih besar, baik medan putar stator maupun putaran rotor. Hal tersebut dikarenakan tegangan input dapat mempengaruhi interaksi antara medan magnet stator dengan medan magnet rotor, dimana medan magnet rotor diperoleh dari tegangan induksi yang disebabkan karena terpotongnya kumparan rotor oleh kumparan stator. Dengan kata lain, tegangan dan frekuensi berbanding lurus dengan banyaknya putaran baik medan putar stator maupun putaran rotor. Berikut ini merupakan grafik hubungan antara tegangan *input*, frekuensi, putaran rotor dan medan putar stator;

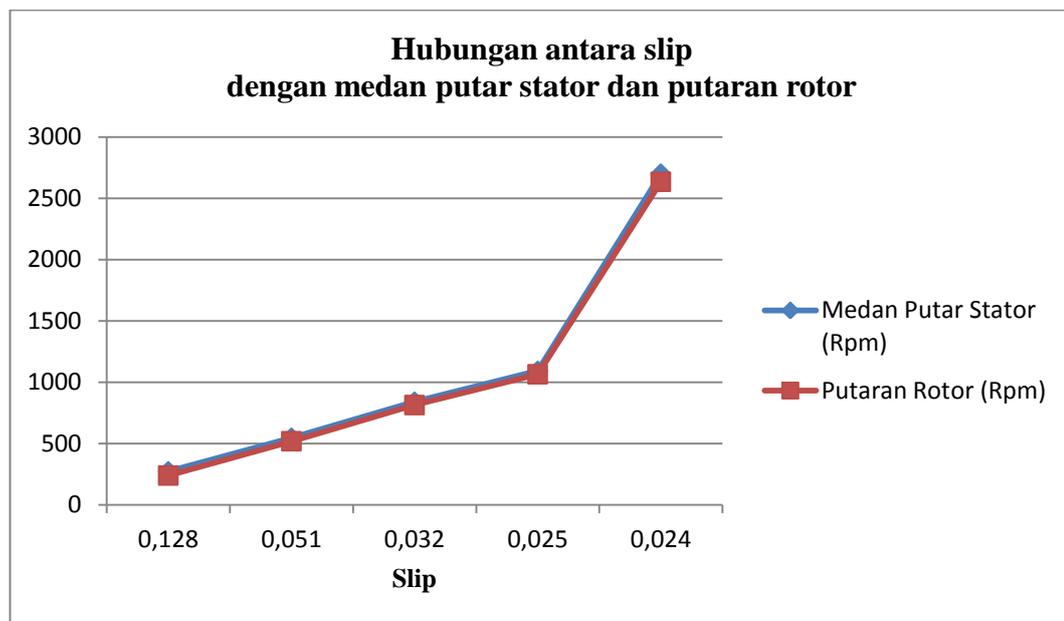


Gambar 38. Grafik hubungan antara tegangan input, frekuensi, putaran rotor dan medan putar stator

Sumber: Dokumen pribadi

Putaran rotor berbanding lurus dengan medan putar stator, karena pada dasarnya putaran medan magnet pada stator diikuti oleh putaran rotor yang terdapat pada motor induksi. Medan putar stator lebih besar apabila dibandingkan oleh medan putaran rotor, hal tersebut disebabkan karena putaran rotor

dipengaruhi oleh beban. Dari hubungan keduanya, dihasilkan slip yang merupakan selisih antara medan putar stator dengan putaran rotor. Hubungan slip dengan putaran dapat dilihat pada grafik dibawah ini;

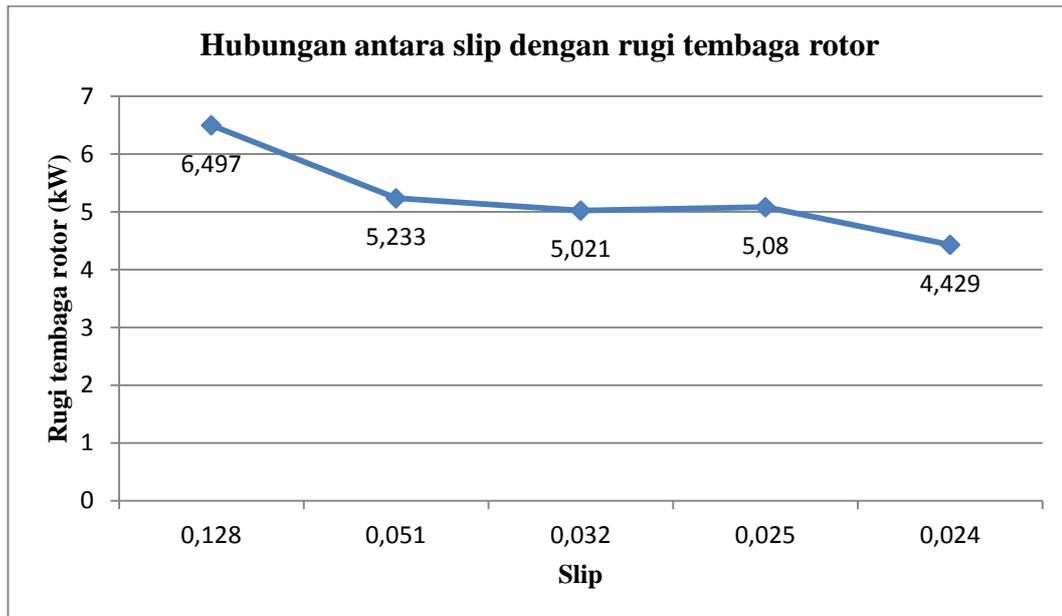


Gambar 39. Grafik hubungan antara slip dengan medan putar stator dan putaran rotor

Sumber: Dokumen pribadi

Semakin besar medan putar stator dan putaran rotor akan menghasilkan slip yang semakin besar. Slip tersebut akan mempengaruhi besarnya rugi-rugi tembaga pada rotor dan frekuensi arus rotor. Ketika rotor dalam keadaan diam, maka besarnya frekuensi arus sama dengan frekuensi sumber, sedangkan ketika rotor dalam keadaan bekerja maka frekuensi rotor tersebut akan dipengaruhi oleh slip sehingga frekuensi pada rotor dikali dengan slip sama dengan frekuensi sumber ($f = f_R \times S$). Hal tersebut akan mempengaruhi besarnya rugi-rugi tembaga pada rotor, dimana besarnya rugi tembaga rotor merupakan hasil perkalian antara slip dengan besarnya daya *input* rotor.

Berikut ini merupakan hubungan antara slip dengan rugi-rugi tembaga rotor;



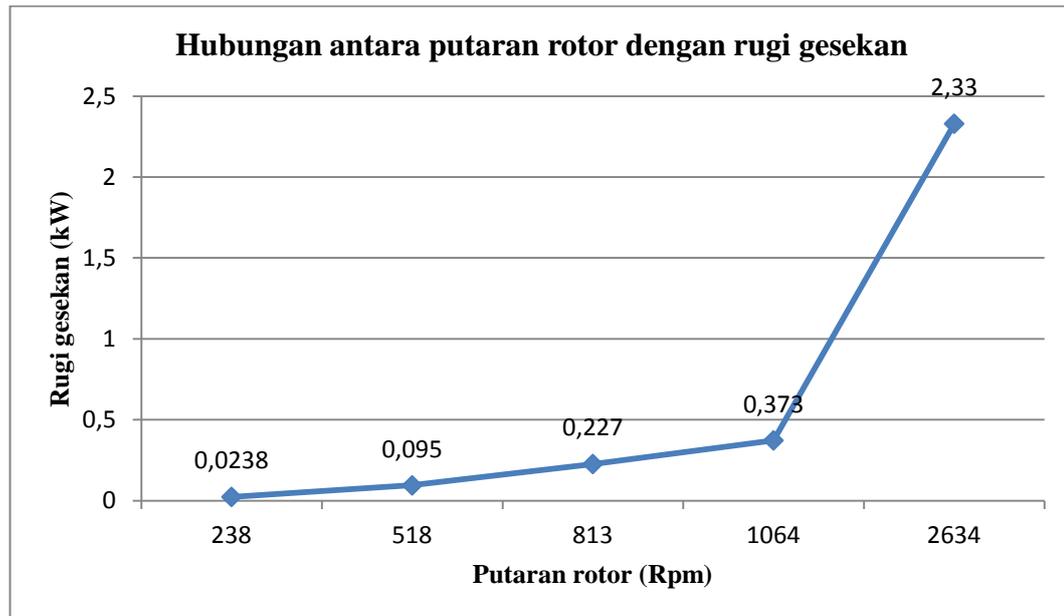
Gambar 40. Grafik hubungan antara slip dengan rugi tembaga rotor

Sumber: Dokumen pribadi

Putaran rotor dapat menimbulkan gaya gesek, gaya gesek tersebut akan mempengaruhi efisiensi dari motor yaitu akan menimbulkan rugi-rugi yang disebut dengan rugi gesekan. Pada tabel hasil perhitungan rugi-rugi motor traksi dengan lima kondisi dapat diketahui bahwa besarnya rugi gesekan berbanding lurus dengan banyaknya putaran rotor.

Ketika putaran rotor memiliki nilai yang besar, maka akan menimbulkan rugi gesekan yang besar. Rugi gesekan akan meningkat ketika putaran rotor semakin besar. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik hubungan antara banyaknya putaran rotor dengan rugi gesekan yang mana keduanya memiliki nilai yang berbanding lurus.

Berikut ini merupakan hubungan antara putaran rotor dengan rugi gesekan rotor;



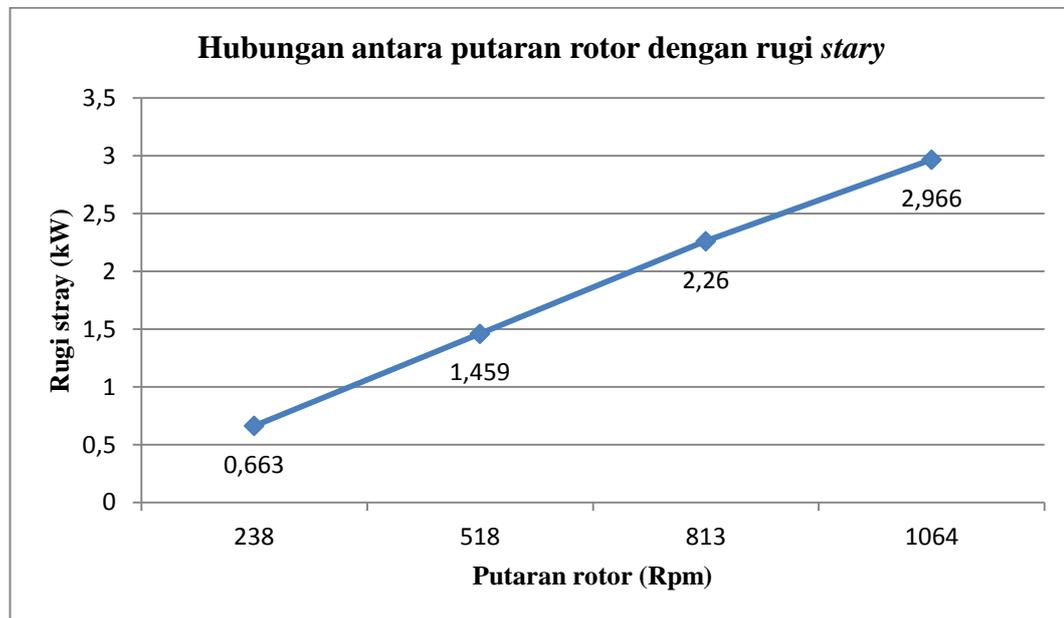
Gambar 41. Grafik hubungan antara putaran rotor dengan rugi gesekan

Sumber: Dokumen pribadi

Selain menimbulkan rugi gesekan, putaran rotor juga menimbulkan rugi-rugi lain atau rugi *stray*, dimana rugi-rugi tersebut sangat sulit untuk diukur. Seperti halnya rugi angin. Perhitungan rugi *stray* menggunakan standar rugi-rugi yang telah ditetapkan oleh IEEE std 112, yang mana besarnya rugi-rugi didasarkan pada *presentase* dari daya keluaran.

Untuk perhitungan kali ini menggunakan *presentase* 1,5% dari daya keluaran. Besarnya rugi *stray* berbanding lurus dengan banyaknya putaran pada rotor, ketika nilai putaran rotor besar maka rugi angin yang dihasilkan akan bernilai besar.

Berikut ini merupakan hubungan antara putaran rotor dengan rugi *stary*;



Gambar 42. Grafik hubungan antara putaran rotor dengan rugi *stary*

Sumber: Dokumen pribadi

4.3.6 Rugi-rugi secara keseluruhan

Setelah mengetahui besarnya rugi-rugi yang terdapat pada *inverter* VVVF IGBT dan motor traksi AC, maka akan ditampilkan besarnya rugi-rugi dan efisiensi di kedua komponen yang terdapat pada sistem *propulsi* pada KRL.

Besarnya rugi-rugi dan efisiensi pada gerbong M1 dan M2 adalah sama, karena pada penelitian ini besarnya daya *input* dan beban pada gerbong M1 dan M2 diasumsikan besarnya sama. Dimana setiap gerbong M mempunyai dua buah *inverter* VVVF IGBT yang masing-masing mengendalikan dua buah motor traksi, sehingga disetiap gerbong M terdapat empat buah motor traksi. Untuk rangkaian satu set KRL terdapat empat buah VVVF IGBT dengan jumlah motor traksi delapan buah.

Berikut ini merupakan tabel hasil rugi-rugi inverter VVVF IGBT dan motor traksi AC pada sistem *propulsi* KRL dengan lima kondisi pengujian;

Tabel 12. Hasil rugi-rugi dan efisiensi pada lima kondisi pengujian

Kondisi ke-	Nama Komponen	P _{in} (kW)	P _{out} (kW)	P _{loss} (kW)	η (%)
I	Inverter VVVF IGBT 1	450	364,912	85,088	81,1
	Inverter VVVF IGBT 2	450	364,912	85,088	81,1
	Motor Induksi 1	59,893	16,323	43,570	72,75
	Motor induksi 2	59,893	16,323	43,570	72,75
	Motor induksi 3	59,893	16,323	43,570	72,75
	Motor Induksi 4	59,893	16,323	43,570	72,75
II	Inverter VVVF IGBT 1	450	396,283	53,717	88,06
	Inverter VVVF IGBT 2	450	396,283	53,717	88,06
	Motor Induksi 1	111,04	95,825	15,215	86,30
	Motor induksi 2	111,04	95,825	15,215	86,30
	Motor induksi 3	111,04	95,825	15,215	86,30
	Motor Induksi 4	111,04	95,825	15,215	86,30
III	Inverter VVVF IGBT 1	450	405,63	44,37	90,14
	Inverter VVVF IGBT 2	450	405,63	44,37	90,14
	Motor Induksi 1	165,9	149,407	16,493	90,06
	Motor induksi 2	165,9	149,407	16,493	90,06
	Motor induksi 3	165,9	149,407	16,493	90,06
	Motor Induksi 4	165,9	149,407	16,493	90,06

Tabel 13. Hasil rugi-rugi dan efisiensi pada lima kondisi pengujian (lanjutan)

Kondisi ke-	Nama Komponen	Pin (kW)	Pout (kW)	Ploss (kW)	η (%)
IV	Inverter VVVF IGBT 1	450	408,004	41,996	90,67
	Inverter VVVF IGBT 2	450	408,004	41,996	90,67
	Motor Induksi 1	213	194,781	18,219	91,45
	Motor induksi 2	213	194,781	18,219	91,45
	Motor induksi 3	213	194,781	18,219	91,45
	Motor Induksi 4	213	194,781	18,219	91,45
V	Inverter VVVF IGBT 1	450	408,032	41,968	90,67
	Inverter VVVF IGBT 2	450	408,032	41,968	90,67
	Motor Induksi 1	191,744	175,09	16,645	91,32
	Motor induksi 2	191,744	175,09	16,645	91,32
	Motor induksi 3	191,744	175,09	16,645	91,32
	Motor Induksi 4	191,744	175,09	16,645	91,32