BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab IV membahas hasil desain generator sinkron magnet permanen dengan menggunakan perangkat lunak Solidworks, kemudian simulasi menggunakan perangkat lunak MagNet Infolytica untuk generator sinkron magnet permanen dengan jenis magnet permanen Neodymium Iron Boron menghasilkan *output* berupa data tegangan, arus, torsi, daya, dan torsi *cogging*. Setelah mendapatkan hasil simulasi generator sinkron magnet permanen dengan jenis magnet permanen Neodymium Iron Boron untuk daya 500 Watt, setelah itu membandingkan hasil *output* dengan generator sinkron magnet permanen dengan magnet permanen Ceramic pada desain yang sama. Selanjutnya membuat *drawing* generator sinkron magnet permanen yang merupakan hasil akhir dari penelitian ini.

Untuk mendapatkan hasil *output* simulasi generator sinkron magnet permanen, maka dilakukan simulasi tanpa beban generator sinkron magnet permanen, simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen, dan simulasi torsi *cogging* generator sinkron magnet permanen.

4.1 Desain Generator Sinkron Magnet Permanen

Generator sinkron magnet permanen yang disimulasikan berupa model penuh generator sinkron magnet permanen dengan skala 1:1 sehingga hasil simulasi yang dihasilkan dapat mendekati kinerja generator sesungguhnya. Generator sinkron magnet permanen ini memliki 3 bagian utama yaitu bagian stator (inti stator, *teeth*, slot stator, lilitan), bagian rotor (inti rotor, magnet permanen, shaft), dan juga bagian celah udara (celah udara stator, celah udara rotor).

4.1.1 Data Generator Berdasarkan Katalog Dan *Data Sheet* Material Magnet Permanen Yang Didapatkan Dari Beberapa Perusahaan

Data dimensi yang didapatkan berdasarkan katalog dari perusahaan Advanced Motors & Drives dan juga Nidec Corporation adalah dimensi luar genenrator sinkron magnet permanen. Material magnet permanen yang digunakan pada generator sinkron magnet permanen adalah material magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11, kemudian dengan menggnakan desain dan dimensi yang sama dibandingkan dengan menggunakan material magnet permanen jenis Ceramic 11. Karakteristik

masing-masing material magnet sesuai dengan *data sheet* dari perusahaan Eclipse Magnet Ltd. yang terdapat pada Tabel 4.1 untuk material magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 dan Tabel 4.2 untuk material magnet permanen jenis Ceramic 11.

Tabel 4.1 Karakteristik magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 (*Data sheet*).

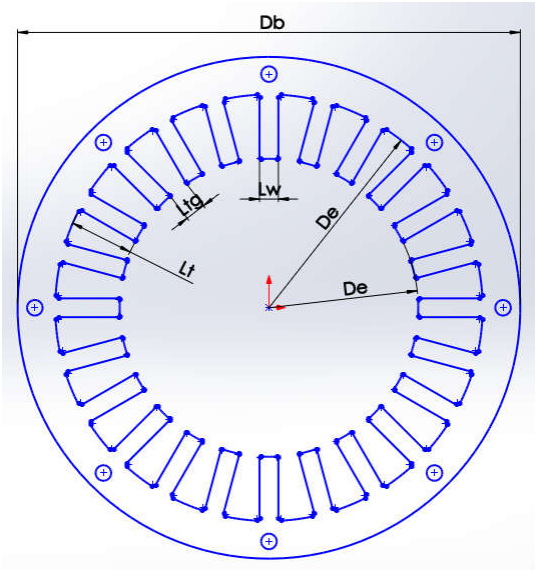
No.	Parameter	Nilai	Satuan
1.	Kerapatan fluks remanensi (B_r)	1375	mT
		13,75	kG
2.	Gaya Koersif (H_c):		
	H_{cb}	820	kA/m
		10,3	kOe
	H_{cj}	875	kA/m
		11	kOe
3.	Produksi Energi (BH_{maks})	48	MGOe
		380	kJ/m^3

Tabel 4.2 Karakteristik magnet permanen jenis Ceramic 11 (*Data sheet*).

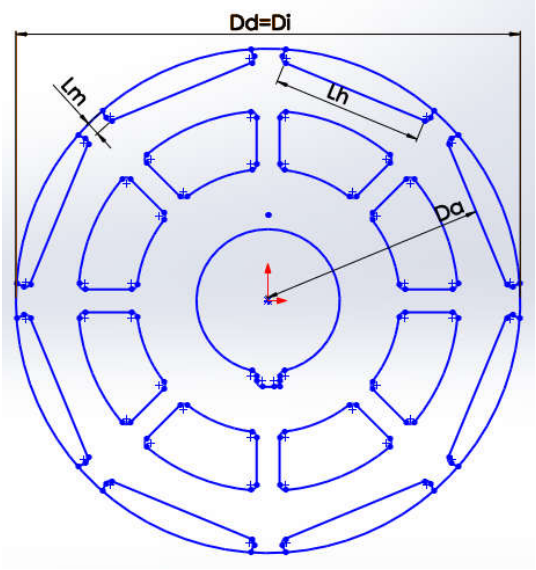
No.	Parameter	Nilai	Satuan
1.	Kerapatan fluks remanens (B_r)	420	mT
		4,2	kG
2.	Gaya Koersif (H_c):		
	H_{cb}	200	kA/m
		2,51	kOe
	H_{cj}	205	kA/m
		2,58	kOe
3.	Produksi Energi (BH_{maks})	4,1	MGOe
		32,5	kJ/m^3

4.1.2 Desain Generator Sinkron Magnet Menggunakan Perangkat Lunak Solidworks

Perangkat lunak Solidworks digunakan untuk mendesain generator sinkron magnet permanen, seperti bagian stator yang terdiri dari inti stator, *stator air*, *teeth*, slot stator, dan juga bagian rotor yang terdiri dari inti rotor, magnet permanen, *rotor air*, dan juga *shaft*.



Gambar 4.1 Desain bagian stator 24 slot menggunakan perangkat lunak Solidworks.



Gambar 4.2 Desain bagian rotor delapan *pole* menggunakan perangkat lunak Solidworks.

Perangkat lunak Solidworks menghasilkan bentuk dua dimensi untuk setiap desain bagian generator sinkron magnet permanen, dan hasil desain setiap bagian generator sinkron magnet permanen disimpan dalam format file *.dxf*. Desain bagian stator dan rotor pada Gambar 4.1 dan 4.2 dibuat berdasarkan dimensi-dimensi yang terdapat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Dimensi generator sinkron magnet permanen

No.	Dimensi	Unit	Nilai
1.	Jumlah slot (N_s)	-	24
2.	Jumlah pole (N_p)	-	8
3.	Diameter dalam magnet (D_a)	mm	79
4.	Diameter luar stator (D_b)	mm	160
5.	Diameter dalam stator (D_c)	mm	95
6.	Diameter luar rotor (D_d)	mm	88
7.	Diameter dalam lubang slot (D_e)	mm	136
8.	Diameter luar magnet (D_i)	mm	88
9.	Tebal inti stator/rotor (L_a)	mm	50
10.	Panjang magnet (L_h)	mm	28
11.	Tebal magnet (L_m)	mm	4,5
12.	Tinggi *umbrella* (L_t)	mm	20,5
13.	Jarak antar slot (L_{tg})	mm	6,51
14.	Lebar *teeth* (L_w)	mm	6
15.	Celah udara (σ_g)	mm	3,5

Pada baris nomor satu dan dua, terdapat jumlah slot dan jumlah *pole* dimana slot berjumlah 24 dan *pole* berjumlah 8. Pasangan jumlah slot dan pole ini ditentukan berdasarkan pasangan slot dan *pole* untuk sistem tiga fasa yang terdapat pada buku Handershot. Selain itu dengan menggunakan pasangan slot dan pole tersebut maka generator sinkron magnet permanen dapat berputar dengan kecepatan yang tidak terlalu tinggi, dengan begitu kecepatan angin yang dibutuhkan untuk memutar rotor juga tidak terlalu tinggi. Sedangkan dari baris nomor tiga sampai lima belas merupakan hasil desain yang dilakukan oleh penulis.

Berdasaarkan Tabel 4.3 yang merupakan data dimensi generator sinkron magnet permanen dapat digunakan untuk mengukur desain rangkaian magnet dan juga desain kumparan stator. Perhitungan desain rangkaian magnet menghasilkan nilai fluks yang melewati celah udara. Dan perhitungan desain kumparan stator menghasilkan banyaknya jumlah lilitan yang dapat dimasukkan pada area slot stator.

1. Desain Rangkaian Magnet

Berdasarkan Persamaan (2.9) sampai (2.17), maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut :

Menghitung luas area magnet per kutub (S_m) :

$$S_m = \pi.\frac{D_i + D_a}{2}.\frac{1}{p}.L_h \qquad (m^2)$$

$$S_m = \pi.\frac{88.10^{-3} + 79.10^{-3}}{2}.\frac{1}{8}.28.10^{-3} = 0{,}92.10^{-3} \qquad (m^2)$$

Menghitung luas ekuivalen gap (S_g) :

$$S_g = \pi.\frac{D_i + D_c}{2}.\frac{N_c}{N_s}.L_a \qquad (m^2)$$

$$S_g = \pi.\frac{88.10^{-3} + 95.10^{-3}}{2}.\frac{12}{24}.50.10^{-3} = 2{,}40.10^{-3} \qquad (m^2)$$

Menghitung koefisien permeance (P_c) :

$$P_c = \frac{L_m.S_g}{\sigma_g.S_m}.\frac{k_f}{k_r}$$

$$P_c = \frac{4{,}5.10^{-3}.2{,}40.10^{-3}}{3{,}5.10^{-3}.0{,}92.10^{-3}}.\frac{1{,}07}{1{,}04} = 3{,}45$$

Menghitung kemiringan kurva demagnetisasi (μ_r) untuk magnet permanenen jenis Neodymium Iron Boron 48/11, dengan nilai fluks remanen (B_r) = 1.375 T, dan nilai *coercive force* (H_{cj}) = $875.10^3 \ A/m$

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_{cj}}.\frac{10^7}{4.\pi}$$

$$\mu_r = \frac{1.375}{875.10^3}.\frac{10^7}{4.\pi} = 1.25$$

Kemiringan kurva demagnetisasi (μ_r) untuk magnet permanenen jenis Ceramic 11, dengan nilai fluks remanen (B_r) = 0.42 T, dan nilai *coercive force* (H_{cj}) = 205.10^3 A/m

$$\mu_r = \frac{B_r}{H_{cj}}.\frac{10^7}{4.\pi}$$

$$\mu_r = \frac{0.42}{205.10^3} . \frac{10^7}{4.\pi} = 1.63$$

Titik pengoperasian generator (B_d), untuk magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 :

$$B_d = \frac{P_c.B_r}{P_c + \mu_r} \quad (T)$$

$$B_d = \frac{3,45.1,375}{3,45 + 1,25} = 0,98 \quad (T)$$

Titik pengoperasian generator (B_d), untuk magnet permanen jenis Ceramic 11 :

$$B_d = \frac{P_c.B_r}{P_c + \mu_r} \quad (T)$$

$$B_d = \frac{3,45.0,42}{3,45 + 1,63} = 0.28 \quad (T)$$

Kerapatan fluks dalam celah udara (B_g), untuk magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 :

$$B_g = \frac{B_d.S_m}{k_f.S_g} \quad (T)$$

$$B_g = \frac{0,98.0,92.10^{-3}}{1,07.2,4.10^{-3}} = 0,35 \quad (T)$$

Kerapatan fluks dalam celah udara (B_g), untuk magnet permanen jenis ceramic 11 :

$$B_g = \frac{B_d.S_m}{k_f.S_g} \quad (T)$$

$$B_g = \frac{0,28.0,92.10^{-3}}{1,07.2,4.10^{-3}} = 0,11 \quad (T)$$

Kerapatan fluks dalam celah udara rata-rata ($B_g{}'$), untuk magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 :

$$B_g{}' = \frac{2}{\pi}.B_g \quad (T)$$

$$B_g{}' = \frac{2}{\pi}.0,35 = 0,22 \quad (T)$$

Kerapatan fluks dalam celah udara rata-rata ($B_g{}'$), untuk magnet permanen jenis Ceramic 11 :

$$B_g{}' = \frac{2}{\pi}.B_g \qquad (T)$$

$$B_g{}' = \frac{2}{\pi}.0{,}11 = 0{,}07 \qquad (T)$$

Jumlah fluks efektif yang melalui celah udara ke koil, untuk magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 :

$$\Phi_g = B_g.S_g \quad (Wb)$$

$$\Phi_g = 0{,}35.2{,}4.10^{-3} = 8{,}4.10^{-4} \quad (Wb)$$

Jumlah fluks efektif yang melalui celah udara ke koil, untuk magnet permanen jenis Ceramic 11 :

$$\Phi_g = B_g.S_g \quad (Wb)$$

$$\Phi_g = 0{,}11.2{,}4.10^{-3} = 2{,}64.10^{-4} \quad (Wb)$$

Jumlah fluks efektif rata-rata yang melalui celah udara ke koil, untuk magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 :

$$\Phi_g' = \frac{2}{\pi}.\Phi_g \quad (Wb)$$

$$\Phi_g' = \frac{2}{\pi}.8{,}4.10^{-4} = 5{,}34.0^{-4} \quad (Wb)$$

Jumlah fluks efektif rata-rata yang melalui celah udara ke koil, untuk magnet permanen jenis Ceramic 11 :

$$\Phi_g' = \frac{2}{\pi}.\Phi_g \quad (Wb)$$

$$\Phi_g' = \frac{2}{\pi}.2{,}64.10^{-4} = 1{,}68.10^{-4} \quad (Wb)$$

2. Desain Kumparan Stator

Berdasarkan Persamaan (2.18) sampai (2.20) maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

Menghitung luas lubang slot (A_s) :

$$A_s = \pi \frac{D_e^{\ 2} - D_c^{\ 2}}{4} . \frac{1}{N_s} - L_{tg} . L_t - \frac{\pi . D_e - L_{tg} . N_s}{N_s} . L_t - L_w . \frac{D_e - D_c - 2.L_t}{2} \quad (m^2)$$

$$A_s = \pi \frac{(136.10^{-3})^2 - (95.10^{-3})^2}{4} . \frac{1}{24} - (6{,}51.10^{-3}.1.10^{-3})$$

$$- \frac{\pi.136.10^{-3} - 6{,}51.10^{-3}.24}{24} .1.10^{-3} - 6.10^{-3} . \frac{136.10^{-3} - 95.10^{-3} - 2.1.10^{-3}}{2}$$

$$= 1{,}72.10^{-4} \ (m^2)$$

Menghitung luas area slot (A_o) yang dapat terisi oleh lilitan :

$$A_o = As . \frac{S_f}{100} \quad (m^2)$$

$$A_o = 1{,}72.10^{-4} . \frac{60}{100} = 1{,}03.10^{-3} \quad (m^2)$$

Menghitung jumlah lilitan (N_t) yang dapat diisi dalam slot :

$$\frac{N_t}{2} = \frac{A_S}{\frac{\pi.(d.10^{-3})^2}{4}}$$

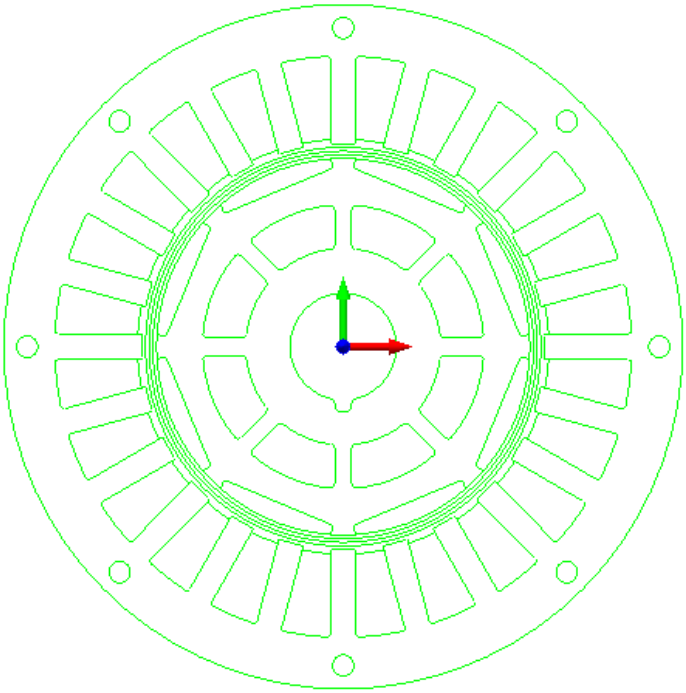
$$\frac{N_t}{2} = \frac{1{,}72.10^{-4}}{\frac{\pi.(0{,}81.10^{-3})^2}{4}} = 333{,}78$$

maka jumlah lilitan yang dapat diisi dalam slot adalah :

$$N_t = 333{,}78.2 = 667 \text{ lilitan}$$

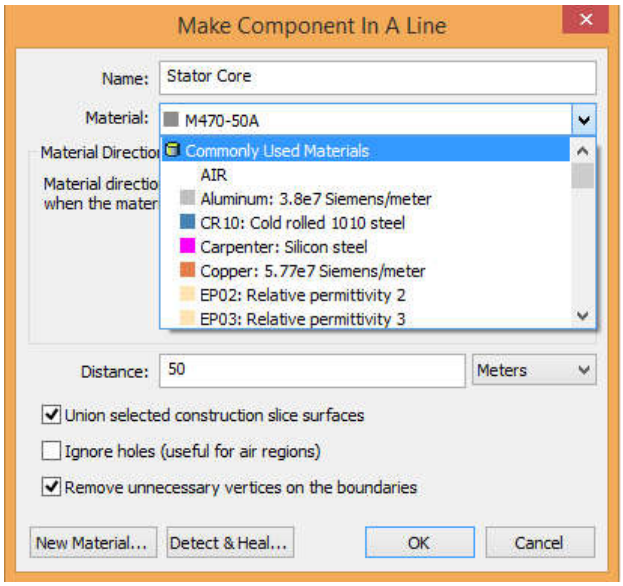
4.1.3 Inisialisasi Desain Generator Sinkron Magnet Menggunakan Perangkat Lunak MagNet Infolytica

Inisialisasi merupakan langkah untuk memberikan nama, sekaligus menentukan jenis material yang digunakan pada masing-masing bagian generator sinkron magnet permanen yang telah didesain sebelumnya. Sebelum memulai proses inisialisasi, desain generator sinkron magnet permanen di-*import* pada perangkat lunak MagNet Infolytica untuk masing-masing file stator dan rotor. Hasil *import* desain pada perangkat lunak MagNet Infolytica dapat dilihat pada Gambar 4.3.

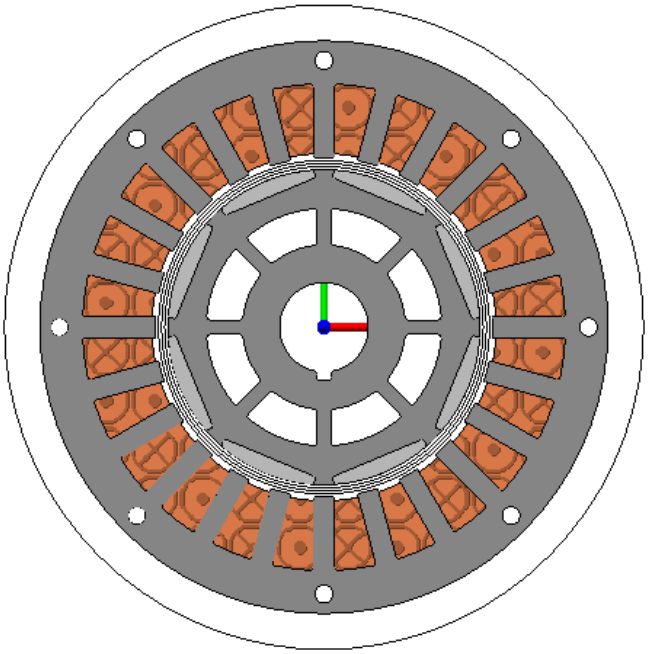


Gambar 4.3 Hasil *import* file desain generator sinkron magnet permanen.

Setelah itu dilakukan inisialisasi desain generator sinkron magnet permanen dengan memilih masing-masing bagian generator sinkron magnet permanen, kemudian memberikan nama, menentukan jenis material yang digunakan, dan juga menentukan tebal masing-masing bagian generator sinkron magnet permanen.



Gambar 4.4 Proses pemberian nama dan penentuan jenis material pada perangkat lunak MagNet Infolytica.



Gambar 4.5 Hasil Inisialisasi generator sinkron magnet permanen.

Masing-masing bagian generator sinkron magnet permanen dalam proses inisialisasi menggunakan material yang berbeda-beda. Untuk mengetahui material yang digunakan pada masing-masing bagian generator sinkron magnet permanen dapat dilihat pada Tabel 4.4.

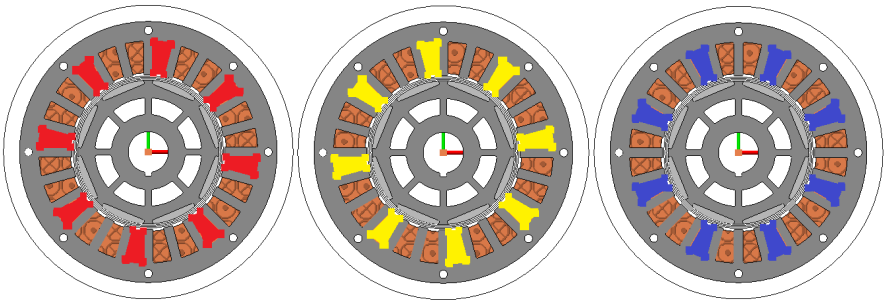
Tabel 4.4 Material masing-masing bagian generator sinkron magnet permanen

No.	Bagian Stator	Bahan Material
1.	*Air Box*	*Air*
2.	Stator *Air*	*Virtual Air*
3.	Kumparan	*Copper: 5.77e7 Siemens/meter*
4.	Magnet Material	Nedymium Iron Boron 48/11 & Ceramic 11
5.	Inti Rotor	*Silicon Steel* M470-50A
6.	*Shaft*	*Virtual Air*
7.	Rotor *Air*	*Virtual Air*
8.	*Air Gap*	*Air*
9.	Inti Stator	*Silicon Steel* M470-50A

4.1.4 Kumparan Stator

Dalam membuat kumparan stator, yang perlu ditentukan adalah jenis kumparan stator secara distribusi atau konsentrasi. Dengan menggunakan tipe distribusi maka fluks yang mengalir menuju stator bisa lebih merata dibandingkan jenis konsentrasi. Untuk hubungan antara kumparan fasa ada 2 tipe, yaitu tipe hubung bintang dan tipe hubung segitiga. Tipe hubung bintang digunakan untuk mendapatkan tegangan besar dengan arus kecil, sedangkan tipe hubung segitiga digunakan untuk mendapatkan

tegangan kecil dengan arus besar. Dalam penelitian ini jenis kumparan stator yang digunakan adalah jenis distribusi dengan hubung kumparan stator menggunkana tipe hubung bintang. Gambar 4.6 adalah bentuk kumparan stator untuk tiap fasa U, V, dan W. Yang membedakan fasa U,V, dan W pada Gambar 4.6 adalah lubang slot yang digunakan, dimana fasa U, V dan W berjarak masing-masing satu slot dengan urutan dimulai dari fasa U, dilanjutkan dengan fasa V, dan yang terakhir fasa W.



a. fasa U b. Fasa V c. Fasa W

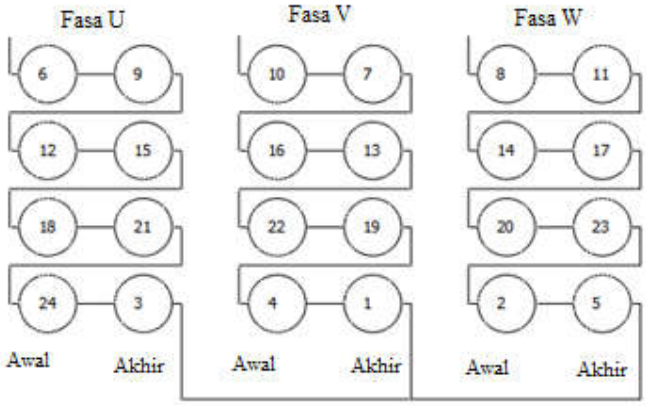
Gambar 4.6 Desain kumparan untuk masing-masing fasa.

Dalam membuat kumparan stator jenis distribusi, yang perlu diketahui adalah jarak slot untuk satu kumparan (*coil span*). Untuk menentukan nilai tersebut dapat menggunkan:

$$coilspan = \frac{N_s}{p}$$

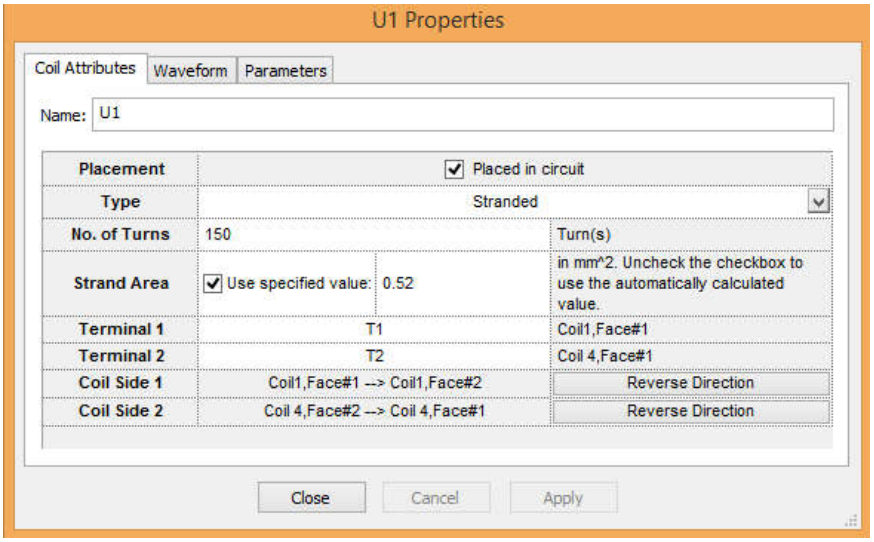
$$coilspan = \frac{24}{8} = 3$$

Jarak slot untuk satu kumparan (*coil span*) adalah 3, sehingga pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa ujung awal kumparan dimasukkan pada salah satu slot dan akan keluar pada jarak 3 lubang slot berikutnya.



Gambar 4.7 Diagram kumparan generator sinkron magnet permanen

Misalkan pada fasa U, ujung awal kumparan diletakkan pada slot 6 dan ujung akhir kumparan berada di slot nomor 9, pada fasa V ujung awal kumparan diletakkan pada slot dengan nomor 10 dan ujung akhir berada di slot nomor 7, dan untuk fasa W ujung awal kumparan diletakkan pada slot dengan nomor 8 dan ujung akhir kumparan berada pada slot nomor 11.

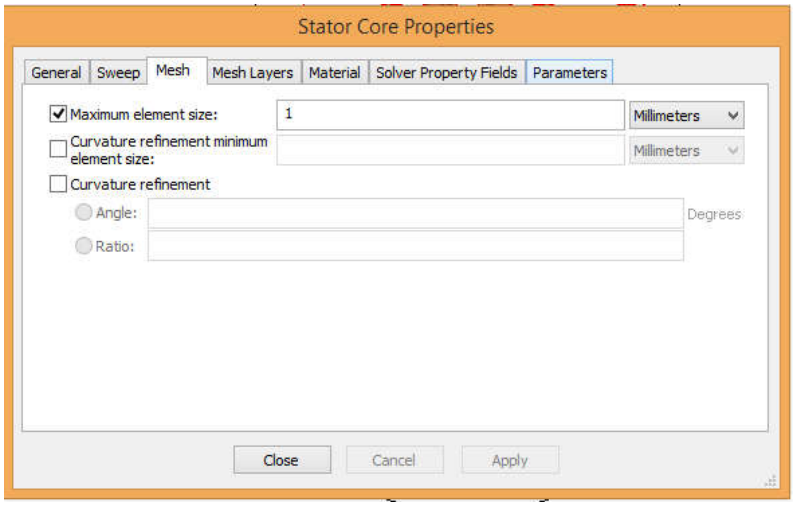


Gambar 4.8 Menentukan jumlah lilitan tiap kumparan

Setelah membuat rangkaian kumparan stator maka tahap selanjutnya adalah menentukan jumlah lilitan pada tiap kumparan. Pada penelitian ini jumlah lilitan yang digunakan adalah 150 lilitan. Karena arus yang mengalir pada generator sebesar 2,27 Ampere, maka jenis konduktor yang digunakan adalah konduktor AWG 20 dengan spesifikasi arus maksimal yang mengalir pada konduktor sebesar 5 Ampere, diameter konduktor 0,81 mm, luas permukaan konduktor 0,52 m^2(sesuai pada Lampiran IV), seperti yang tertera pada Gambar 4.8.

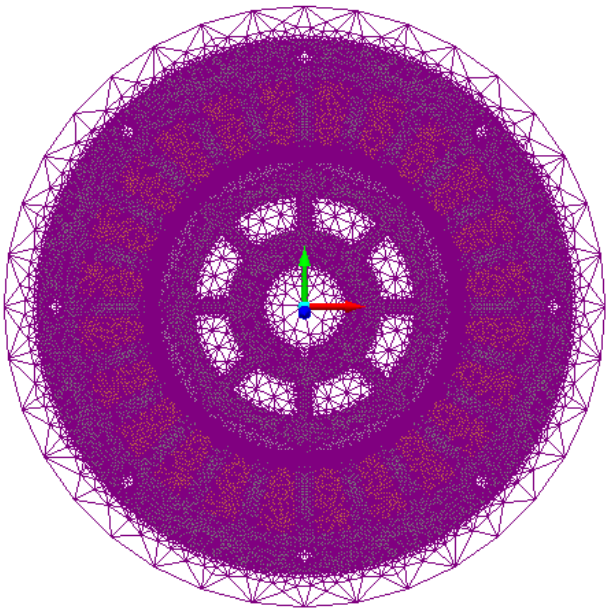
4.1.5 *Mesh*

Pengaturan *mesh* dilakukan untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih baik. Metode *mesh* ini membagi-bagi setiap bagian penampang melintang (*cross section*) pada analisa 2D menjadi area-area kecil yang disebut *finite element* atau *mesh*. Untuk menentukan besar nilai *mesh* yang digunakan, maka pada kolom Maximum element size dicentang, seperti yang terdapat pada Gambar 4.9. Pengaturan *mesh* pada setiap bagian generator sinkron magnet permanen berbeda-beda.



Gambar 4.9 Menentukan *mesh* masing-masing bagian

Pada bagian inti stator, inti rotor, magnet permanen, dan *coil* menggunakan *mesh* sebesar 1 mm. Untuk bagian *celah udara* menggunakan *mesh* sebesar 0.5 mm. Sedangkan *stator air, rotor air, shaft,* dan *air box* menggunakan mesh secara *default*. Setelah mengatur *mesh* hasil pengaturannya dapat dilihat seperti pada Gamabr 4.9. Setelah mengatur *mesh* pada masing-masing bagiam generator, maka dilanjutkan dengan mengecek *mesh* secara keselurahan bagian generator sinkron magnet permanen. Pada Gambar 4.10 dapat dilihat tampilan *mesh* pada seluruh bagian generator sinkron magnet permanen.



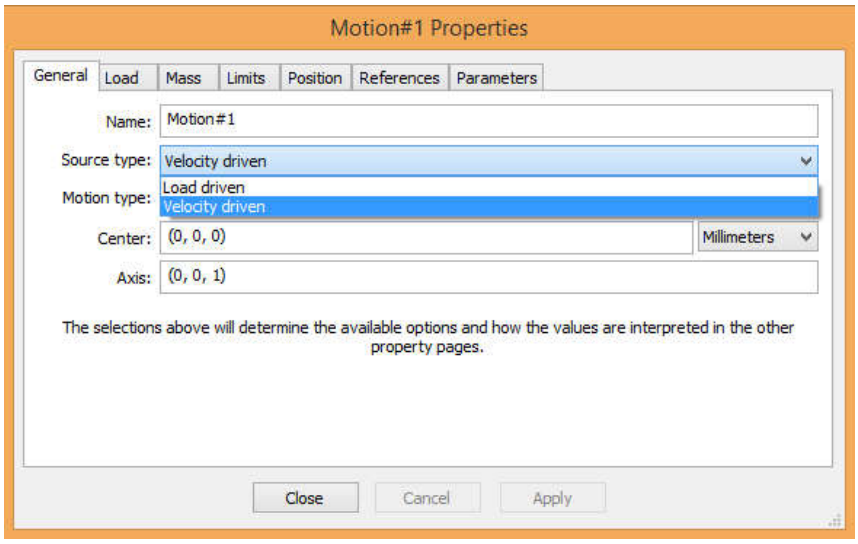
Gambar 4.10 Hasil pengaturan *mesh* generator sinkron magnet permanen

4.1.6 Simulasi Model Generator Sinkron Magnet Permanen

Sebelum memulai simulasi generator sinkron magnet permanen, terdapat beberapa tahapan yang harus dilakukan yakni pengaturan parameter-parameter simulasi seperti pembuatan *motion* atau mengatur bagian mana saja yang akan berputar dengan kecepatan yang ditentukan, dan juga mengatur parameter simulasi berupa waktu yang dibutuhkan untuk berputar dengan kecepatan yang ditentukan oleh generator sinkron magnet permanen.

1. *Motion* Bagian Rotor

Motion merupakan langkah untuk menentukan bagian-bagian mana saja yang akan berputar. Adapun bagian-bagian yang diatur untuk berputar pada simulasi ini adalah bagian rotor (inti rotor, magnet permanen, *rotor air*, *shaft*), celah udara rotor, dan *air box* rotor. Untuk simulasi generator pada pilihan *Source type* memilih *Velocity driven*.



Gambar 4.11 Parameter *motion* generator sinkron magnet permanen.

Putaran generator sinkron magnet permanen ini sendiri menggunakan kecepatan putar sinkronnya yaitu pada kecepatan 750 rpm pada frekuensi 50 Hz. Sesuai dengan Persamaan 2.4, yaitu :

$$f = \frac{n.p}{120}$$

$$n = \frac{120.f}{p} = \frac{120.50}{8} = 750 \quad (rpm)$$

Setelah mendapatkan nilai kecepatan putar sinkron pada generator sinkron magnet permanen, maka selanjutnya memasukkan data kecepatan putar tersebut. Nilai kecepatan putar generator sinkron magnet permanen yang sebelumnya bernilai (rpm) dikonversi menjadi nilai ($\deg/s$), dimana satu rotasi adalah 360(deg), dan satu menit adalah 60 detik.

$$n = 750(rpm) = \frac{750.360(\deg)}{60(\sec)} = 4500 \quad (\deg/s)$$

Pada simulasi generator sinkron magnet permanen, untuk mendapatkan satu gelombang penuh, dilakukan pencuplikan data sebanyak 30 step putaran mekanikal, setiap satu step putaran mekanikal sebesar $3(\deg)$. Sehingga waktu yang dibutuhkan untuk melakukan putaran senilai $3(\deg)$ adalah :

$$\text{waktu satu step putaran mekanikal} = \frac{persteppu\,t\,aran(\deg)}{n\left[\deg/\sec\right]}$$

$$\text{waktu satu step putaran mekanikal} = \frac{3(\deg)}{4500\left[\deg/\sec\right]} = 0.00067(\sec) = 0.67(ms)$$

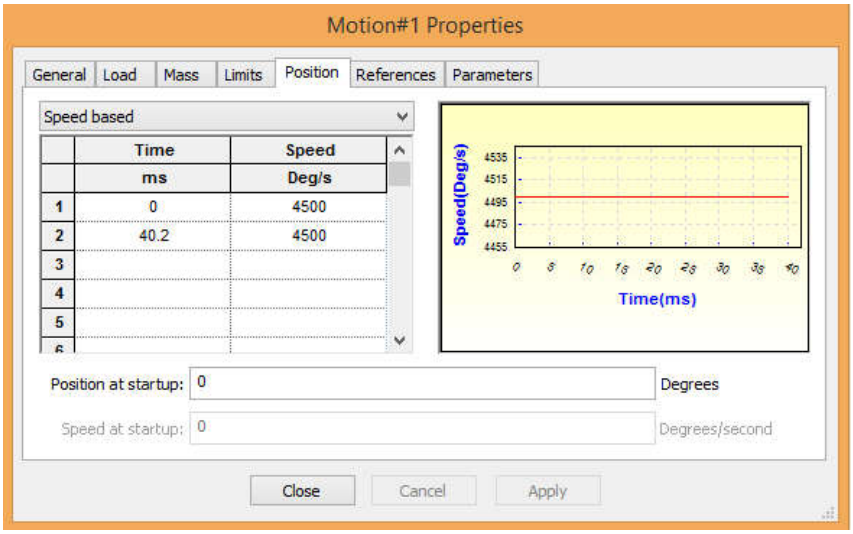
Dari hasil perhitungan dapat diketahui bahwa setiap step putaran mekanikal membutuhakan waktu sebesar $0.67(ms)$. Maka untuk mendapatkan satu gelombang penuh dengan 30 step putaran mekanikal membutuhkan waktu sebanyak :

Waktu untuk 30 step putaran $= 30(step).0{,}67(ms) = 20{,}1\,(\text{ms})$

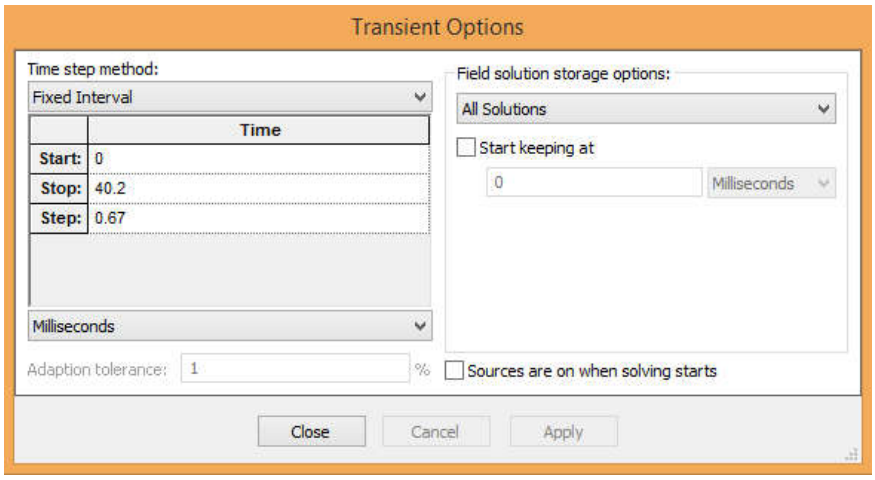
Karena pada penelitian ini generator sinkron magnet permanen disimulsikan untuk mendapatkan dua gelombang penuh dengan 60 step putaran mekanikal, maka :

Waktu untuk 60 step putaran $= 60(step).0{,}67(ms) = 40{,}2\,(\text{ms})$

Setelah mendapatkan data-data waktu putaran, maka selanjutnya memasukkan nilai-nilai tersebut pada Tab Option untuk Motion pada Gambar 4.12 dan menu *Transient Option* pada Gambar 4.13.



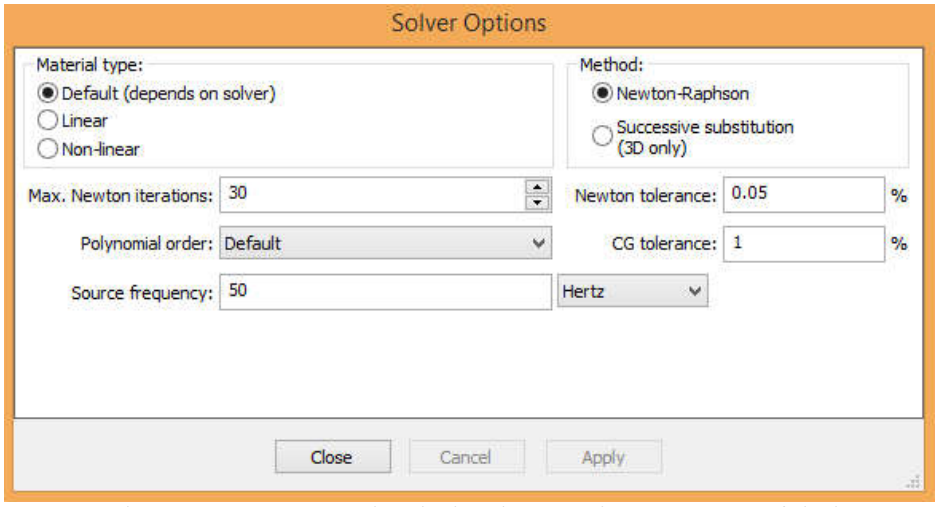
Gambar 4.12 Parameter kecepatan putar generator sinkron magnet permanen.



Gambar 4.13 Transient Option pada perangkat lunak MagNet Infolytica untuk simulasi generator sinkron magnet permanen.

2. Parameter Simulasi

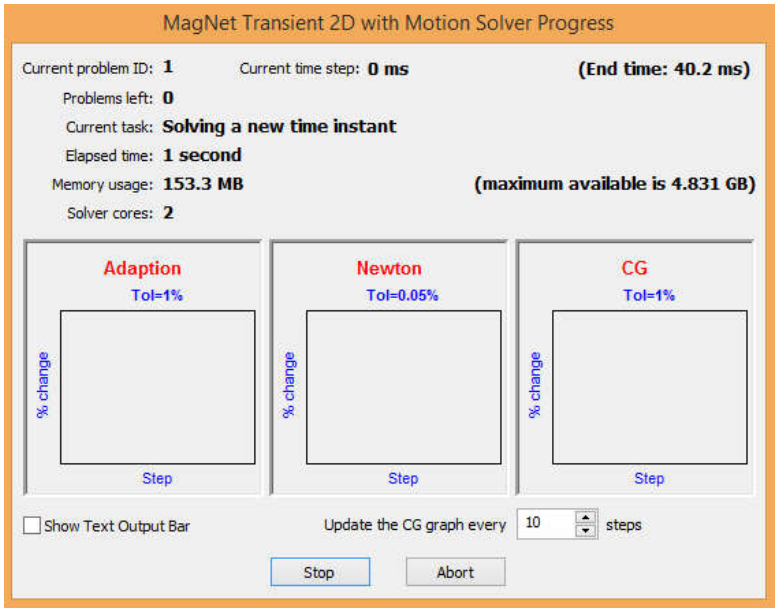
Pada parameter simulasi perangkat lunak MagNet Infolytica, sebelum melakukan simulasi, terlebih mengatur parameter seperti pemilihan metode simulasi, untuk simulasi 2D menggunakan metode Newton-Raphson, selain itu juga menentukan frekuensi yang bekerja pada generator sinkron magnet permanen. Untuk penelitian generator sinkron magnet permanen ini, simulasi pada generator sinkron magnet permanen menggunakan metode Newton Raphson dengan menggunakan maksimum iterasi sebanyak 30, dengan toleransi sebesar 0,05%, seperti pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Parameter simulasi Solver Option MagNet Infolytica.

3. Simulasi Pada Perangkat Lunak MagNet Infolytica

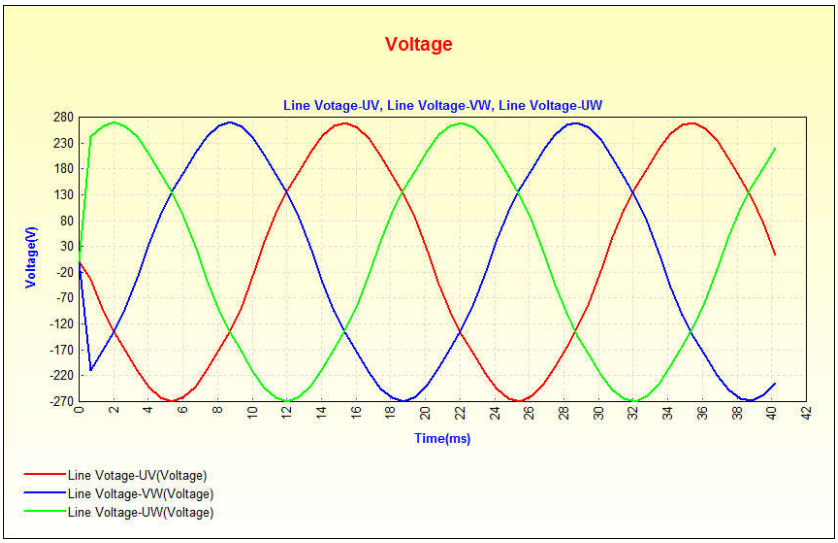
Setelah desain generator sinkron magnet permanen dibuat dan semua parameter diatur pada perangkat lunak MagNet Infolyrica, maka proses selanjutnya adalah memulai simulasi. Gambar 4.15 merupakan proses simulasi pada perangkat lunak MagNet Infolytica. Akhir dari proses simulasi yang dilakukan adalah ketika waktu untuk melakukan putaran telah disimulasikan semua, yaitu pada simulasi ini adalah ketika waktu 40,2 ms untuk melakukan 60 step putaran mekanikal atau dua kali putaran elektrikal telah selesai disimulasikan, maka hasil dari simulasi adalah berupa data-data pada generator sinkron magnet permanen.



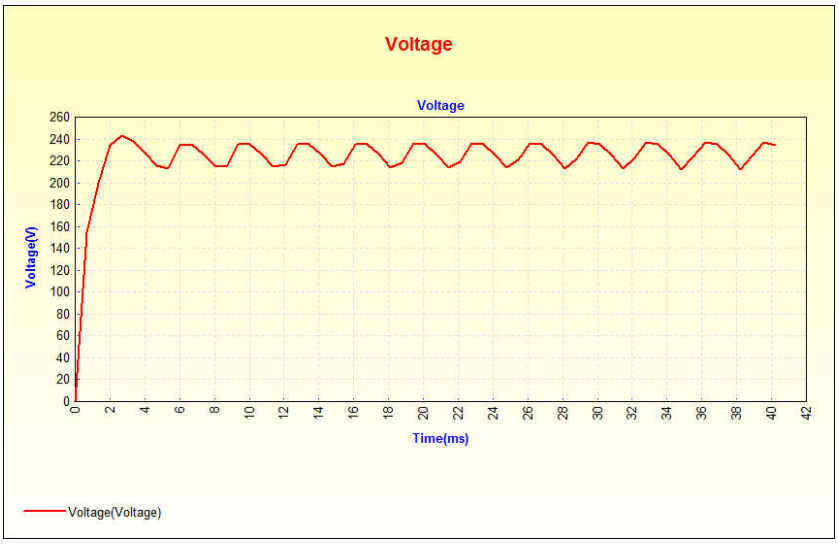
Gambar 4.15 Proses simulasi pada perangkat lunak MagNet Infolytica.

4. Grafik Hasil Simulasi Generataor Sinkron Magnet Permanen Pada Perangkat Lunak MagNet Infolytica

Setelah selesai melakukan simulasi generator sinkron magnet permanen pada perangkat lunak MagNet Infolytica maka selanjutnya adalah melihat data-data hasil simulasi, seperti pada Gambar 4.16 yang merupakan grafik tegangan *line* 3 fasa yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen, dan Gambar 4.17 yang merupakan grafik tegangan DC generator sinkron magnet permanen setelah disearahkan menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa.



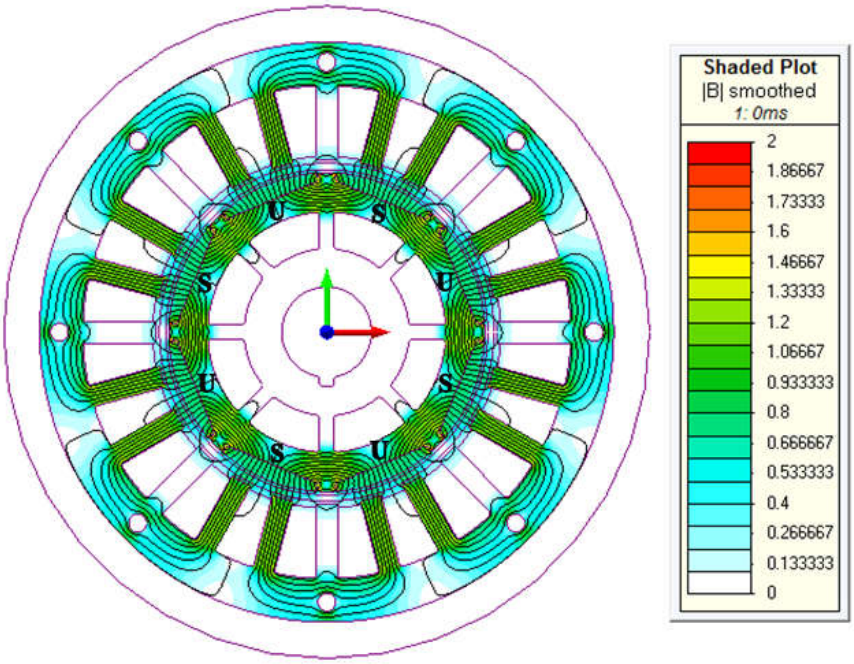
Gambar 4.16 Grafik tegangan *line* pada perangkat lunak MagNet Infolytica.



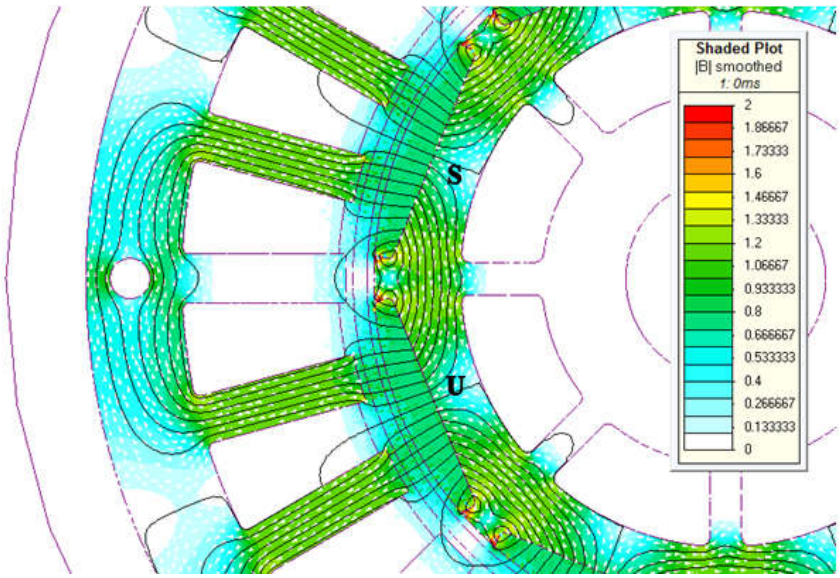
Gambar 4.17 Grafik tegangan DC setelah disearahkan pada perangkat lunak MagNet Infolytica.

4.2 Distribusi Medan Magnet Hasil Simulasi Generator Sinkron Magnet Permanen

Dengan menggunakan perangkat lunak MagNet Infolytica, hasil sebaran medan magnet dan juga garis-garis fluks magnet pada desain generator sinkron magnet permanen dapat dilihat. Hasil distribusi medan berupa arah medan magnet dan juga garis-garis fluks pada simulasi generator sinkron magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 diperlihatkan pada gambar 4.18 dan Gambar 4.19.



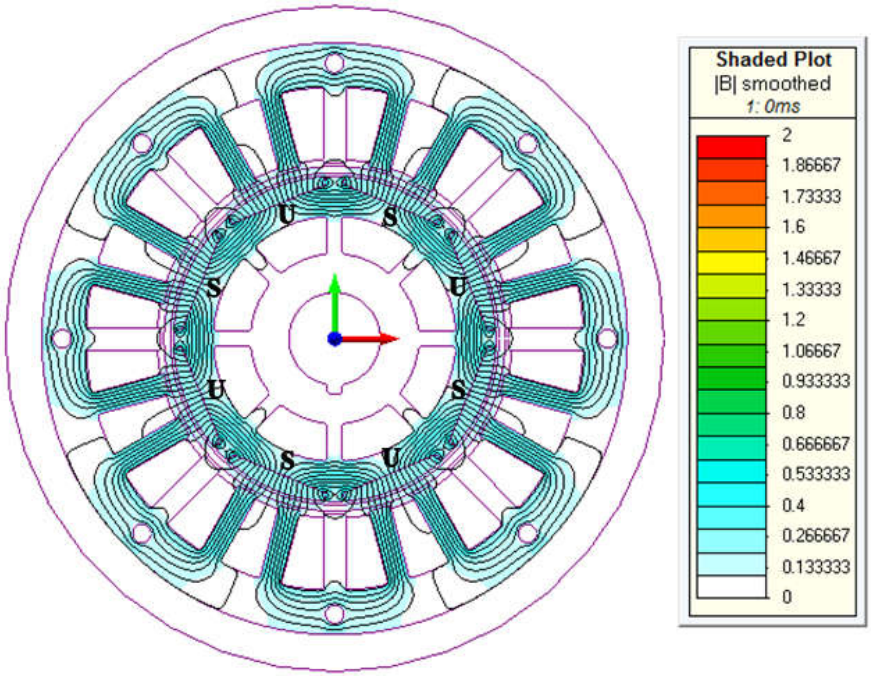
Gambar 4.18 Garis-garis fluks magnet untuk magnet pernanen jenis NdFeB 48/11.



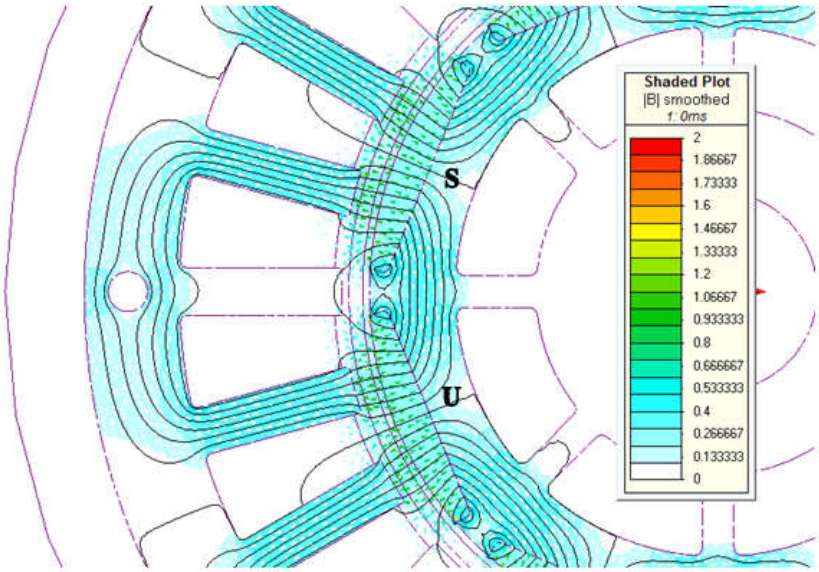
Gambar 4.19 Arah medan magnet untuk magnet pernanen jenis NdFeB 48/11

Besar kerapatan fluks magnet yang mengalir tertera pada tabel Gambar 4.18 diatur dari 0 Tesla sampai 2 Tesla. Pola distribusi menunjukkan bahwa rapat fluks magnet tertinggi terdapat pada bagian *teeth* stator, magnet permanen, dan area dibawah magnet permanen yang ditandai dengan daerah berwarna hijau dengan nilai kerapatan medan magnet pada rentang nilai 0,8 Tesla sampai 1,2 Tesla, kemudian diikuti oleh bagian di luar *teeth* stator ditandai dengan daerah berwarna biru muda dengan nilai kerapatan medan magnet pada rentang nilai 0,13 Tesla sampai 0,67 Tesla. Untuk daerah *air box*, *stator air*, *rotor air*, kumparan stator, bagian tengah inti rotor, dan poros tidak dilalui oleh fluks magnet sehingga pada bagian ini memiliki nilai kerapatan medan magnet yang sangat kecil yaitu mendekati nilai nol sehingga ditandai dengan daerah berwarna putih. Sedangkan untuk bagian yang memiliki kerapatan medan magnet tertinggi berada pada bagian inti rotor yang berdekatan dengan ujung magnet permanen yang ditandai dengan daerah berwarna kining sampai merah dengan nilai kerapatan medan magnet berada pada rentang nilai sebesar 1,6 Tesla sampai 2 Tesla.

Hasil distribusi medan berupa arah medan magnet dan juga garis-garis fluks pada generator sinkron magnet permanen dengan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 diperlihatkan pada gambar 4.20 dan Gambar 4.21. Pola distribusi menunjukkan bahwa rapat fluks magnet tertinggi terdapat pada bagian *teeth* stator, magnet permanen, dan area dibawah magnet permanen yang ditandai dengan daerah berwarna biru muda dengan nilai kerapatan medan magnet pada rentang nilai 0,13 Tesla sampai 0,53 Tesla, kemudian diikuti oleh bagian di luar *teeth* stator ditandai dengan daerah berwarna biru muda dengan nilai kerapatan medan magnet pada rentang nilai 0,13 Tesla sampai 0,67 Tesla. Untuk daerah *air box*, *stator air*, *rotor air*, kumparan stator, bagian tengah inti rotor, dan poros tidak dilalui oleh fluks magnet sehingga pada bagian ini memiliki nilai kerapatan medan magnet yang sangat kecil yakni mendekati nol sehingga ditandai dengan daerah berwarna putih. Sedangkan untuk bagian yang memiliki kerapatan medan magnet tertinggi berada pada bagian inti rotor yang berdekatan dengan ujung-ujung magnet permanen yang ditandai dengan daerah berwarna hijau dengan nilai kerapatan medan magnet berada pada rentang nilai sebesar 0,8 Tesla sampai 1,2 Tesla.



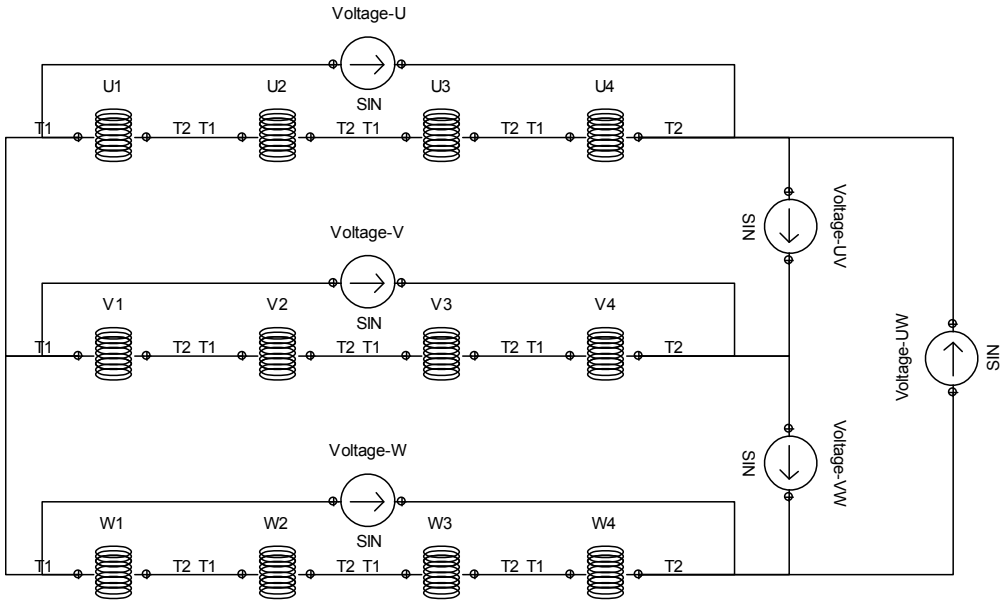
Gambar 4.20 Garis-garis magnet untuk magnet pernanen jenis Ceramic 11



Gambar 4.21 Arah medan magnet untuk magnet pernanen jenis Ceramic 11

4.3 Simulasi Tanpa Beban Generator Sinkron Magnet Permanen

Gambar 4.22 menampilkan rangkaian untuk simulasi tanpa beban generator sinkron magnet permanen. Simulasi tanpa beban generator sinkron magnet permanen menghasilkan tegangan fasa dan tegangan *line*.



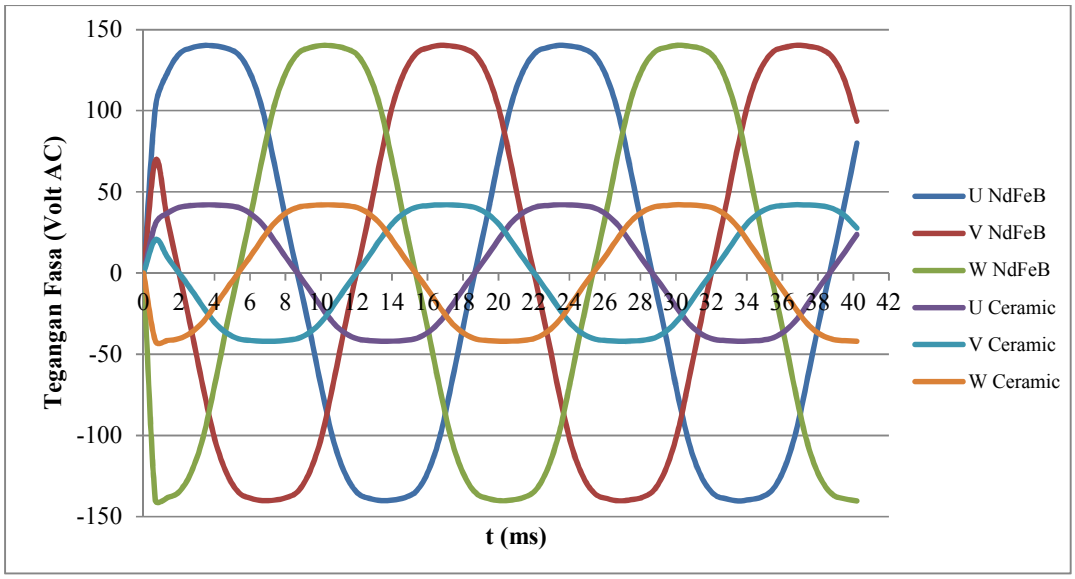
Gambar 4.22 Rangkaian simulasi tanpa beban generator sinkron magnet permanen

Keterangan *U1* sampai *U4*, *V1* sampai *V4*, dan *W1* sampai *W4* pada Gambar 4.21 merupakan keterangan untuk masing-masing lilitan fasa. *U1* sampai *U4* merupakan lilitan fasa *U*, *V1* sampai *V4* merupakan lilitan fasa *V*, dan *W1* sampai *W4* merupakan keterangan untuk lilitan fasa *W*, dan ketiga lilitan fasa dirangkai dengan hubung bintang. Pada Gambar 4.21 juga dapat dilihat terdapat alat ukur *Voltage-U*, *Voltage-V*, *Voltage-W*, *Line Voltage-UV*, *Line Voltage-VW*, dan *Line Voltage-UW*. Keterangan untuk *Voltage-U*, *Voltage-V*, dan *Voltage W* merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur masing-masing tegangan fasa. Dan keterangan untuk *Line Voltage-UV*, *Line Voltage-VW*, dan *Line Voltage-UW* merupakan alat ukur yang digunakan untuk mengukur masing-masing tegangan *line* generator sinkron magnet permanen.

4.3.1 Tegangan Fasa Generator Sinkron Magnet Permanen

Gambar 4.23 menunjukkan grafik tegangan fasa generator sinkron magnet permanen yang dibandingkan dengan magnet permanen jenis Ceramic 11. Generator sinkron magnet permanen mulai berputar dari waktu 0 ms, dan pada waktu 0,67 ms generator sinkron magnet permanen mulai menghasilkan tegangan fasa. Tegangan yang dihasilkan berupa tegangan sinusoidal 3 fasa. Tegangan fasa yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen sebesar 140,38 Volt (sesuai pada Lampiran II-A.1),

kemudian dengan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 menghasilkan tegangan fasa sebesar 42,08 Volt (sesuai pada Lampiran III-A.1).



Gambar 4.23 Tegangan fasa generator sinkron magnet permanen

Dengan menggunakan Persamaan (2-21) sampai (2-23), besar tegangan fasa yang dibangkitkan oleh generator sinkron magnet permanen dapat dicari, yaitu :

$$q = \frac{N_s}{p.n_{ph}}$$

$$q = \frac{24}{8.3} = 1$$

$$K_w = \frac{1}{q}.\frac{\sin(\pi/6)}{\sin(\pi/6.q)}$$

$$K_w = \frac{1}{1}.\frac{\sin\left[\pi/6\right]}{\sin\left[\pi/6.1\right]} = 1$$

Tegangan fasa generator sinkron magnet permanen:

$$E_{ph} = 4{,}44.f.N_c.k_w.k_s.\Phi.\frac{N_s}{N_{ph}} \quad \text{(Volt AC)}$$

$$E_{ph} = 4{,}44.\frac{750.8}{120}.150.1.1.5{,}34.10^{-4}.\frac{24}{3} = 142{,}26 \quad \text{(Volt AC)}$$

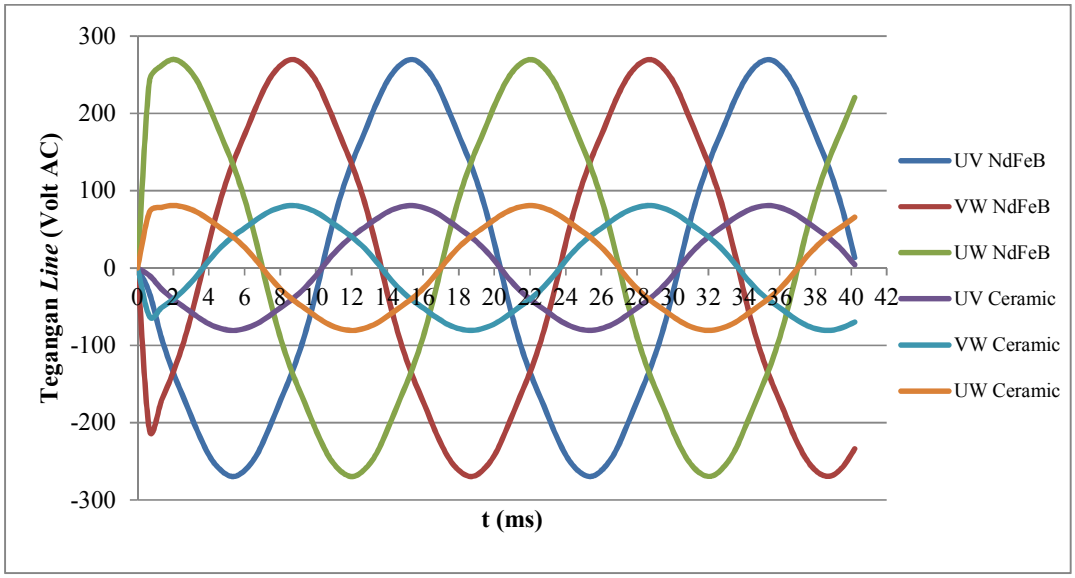
Dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan tersebut, didapatkan hasil untuk masing-masing metode yang dapat dilihat pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Tegangan fasa dengan metode simulasi dan perhitugan.

No.	Jenis Magnet Permanen	Metode	Tegangan Fasa (Volt AC)	Error (%)
1.	Neodymium Iron Boron 48/11	Simulasi	140,38	1,32
		Perhitungan	142,26	
2.	Ceramic	Simulasi	42,08	5,98
		Perhitungan	44,76	

Dari Tabel 4.5 didapatkan data bahwa nilai tegangan fasa generator sinkron magnet permanen untuk metode simulasi dan metode perhitungan tidak begitu jauh berbeda. Dimana ditunjukkan dengan nilai persentase error yang relatif kecil, dengan menggunakan manget permanen Neodymium Iron Boron 48/11 didapatkan error sebesar 1,32% dan dengan menggunakan magnet permanen Ceramic 11 didapatkan error sebesar 5,98%.

4.3.2 Tegangan *Line* Generator Sinkron Magnet Permanen



Gambar 4.24 Tegangan *line* generator sinkron magnet permanen

Gambar 4.24 menunjukkan grafik tegangan *line* generator sinkron magnet permanen yang dibandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11. Tegangan *line* yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen sebebsar 269,72 Volt AC (sesuai pada Lampiran II-A.2), kemudian dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 tegangan *line* puncak yang dihasilkan sebesar 80,83 Volt AC (sesuai pada Lampiran III-A.2). Dengan menggunakan metode

perhitungan, besar tegangan *line* yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2-24) :

$$E_{ll} = E_{ph.}.\sqrt{3} \quad \text{(Volt AC)}$$

$$E_{ll} = 142,26.\sqrt{3} = 246,40 \quad \text{(Volt AC)}$$

Dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan tersebut, didapatkan hasil untuk masing-masing metode yang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Tegangan *line* dengan metode simulasi dan perhitugan.

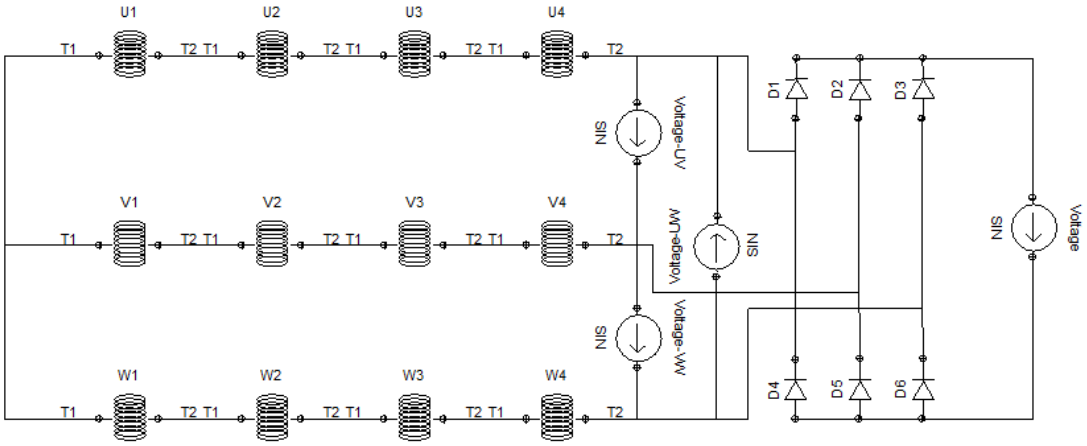
No.	Jenis Magnet Permanen	Metode	Tegangan *Line* (Volt AC)	Error (%)
1.	Nodymium Iron Boron 48/11	Simulasi	269,72	9,46
		Perhitungan	246,40	
2.	Ceramic 11	Simulasi	80,83	4,26
		Perhitungan	77,52	

Dari Tabel 4.6 didapatkan data bahwa nilai tegangan *line* generator sinkron magnet permanen untuk metode simulasi dan metode perhitungan tidak begitu jauh berbeda. Dimana ditunjukkan dengan nilai persentase error yang relatif kecil, dengan menggunakan manget permanen Neodymium Iron Boron 48/11 didapatkan error sebesar 9,46% dan dengan menggunakan magnet permanen Ceramic 11 didapatkan error sebesar 4,26%.

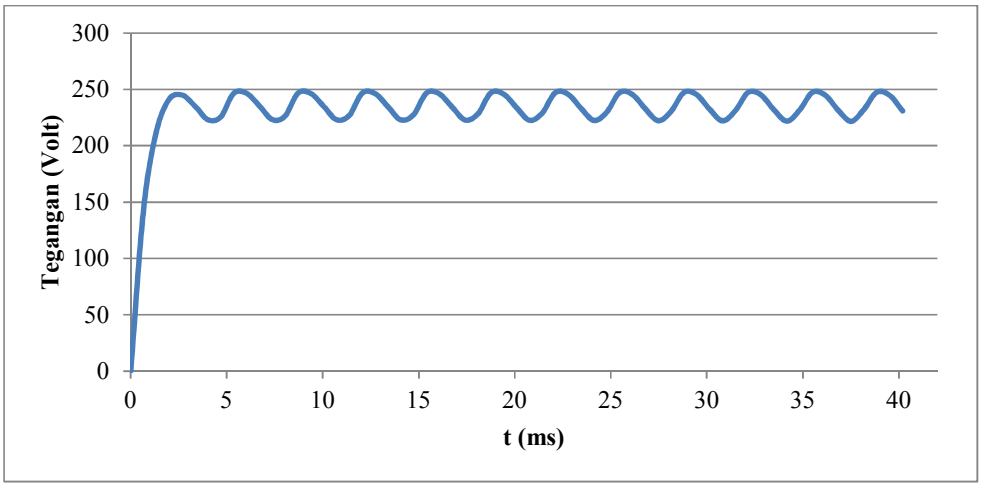
4.4 Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen

Output berupa sistem AC yang dihasilkan generator sinkron magnet permanen tidak dapat langsung digunakan pada beban karena *output* generator sinkron magnet permanen tergantung dari kecepatan angin yang memutar generator sinkron magnet permanen, dimana kecepatan angin yang berhembus tidak selalu konstan. Oleh karena itu *output* generator sinkron magnet permanen berupa sistem AC perlu disearahkan terlebih dahulu menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa sehingga menjadi sistem DC yang sesuai dengan sistem penyimpanan baterai.

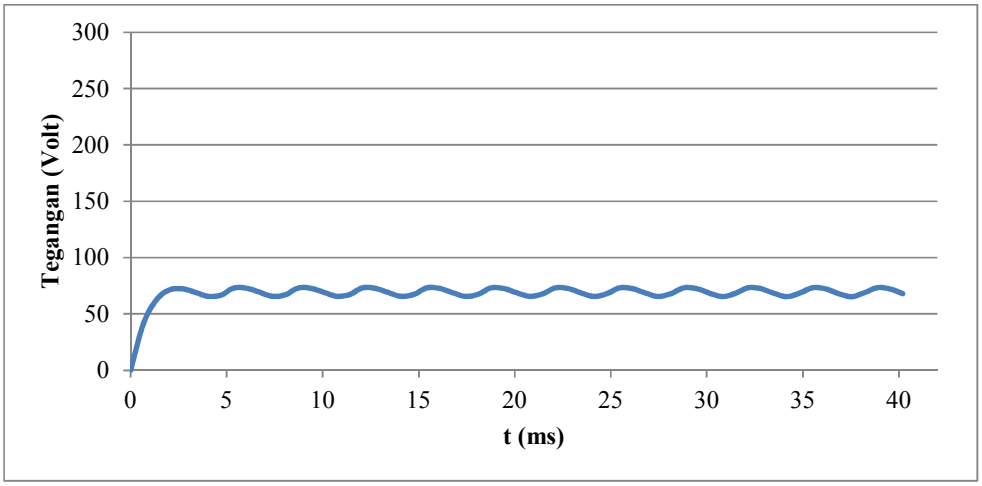
Gambar 4.24 merupakan rangkaian simulasi *open circuit* pada generator sinkron magnet permanen yang digunakan untuk menentukan nilai tahanan (R) yang dipasang pada rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa.



Gambar 4.25 Simulasi *open circuit* pada simulasi generator sinkron magnet permanen



Gambar 4.26 Tegangan *open circuit* pada generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



Gambar 4.27 Tegangan *open circuit* menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 pada generator sinkron magnet permanen dengan beban 22 Ω.

Dari hasil simulasi *open circuit,* pada generator sinkron magnet permanen, simulasi *open circuit* menghasilkan nilai tegangan *open circuit* rata-rata senilai 235,38 Volt DC (sesuai pada Lampiran II-B), dan dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 menghasilkan tegangan *open circuit* rata-rata senilai 69,49 Volt DC (sesuai pada Lampiran III-B).

Untuk menentukan nilai tahanan R dapat dengan menggunakan persamaan :

$$R = \frac{V_{oc}}{I}$$

Nilai tahanan pada generator sinkron magnet permanen dengan menggunakan magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 (sesuai pada Lampiran IV-A) :

$$R = \frac{235{,}38}{2{,}27} = 103{,}69 \ (\Omega) \ \approx \ 100 \ \Omega$$

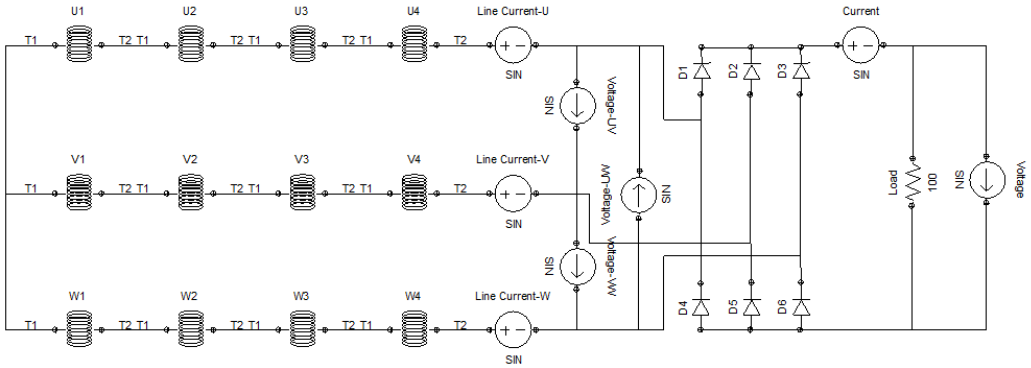
kemudian dengan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, nilai tahanan yang didapatkan adalah :

$$R = \frac{69{,}49}{2{,}27} = 30{,}61 \ (\Omega) \approx 30 \ \Omega$$

Tetapi dalam simulasi dengan menggunakan beban sebesar 30 Ω, didapatkan nilai arus rata-rata sebesar 1,82 Ampere, sehingga dalam simulasi berbeban untuk perbandingan dengan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 menggunakan tahanan sebesar 22 ohm (sesuai pada Lampiran IV-B).

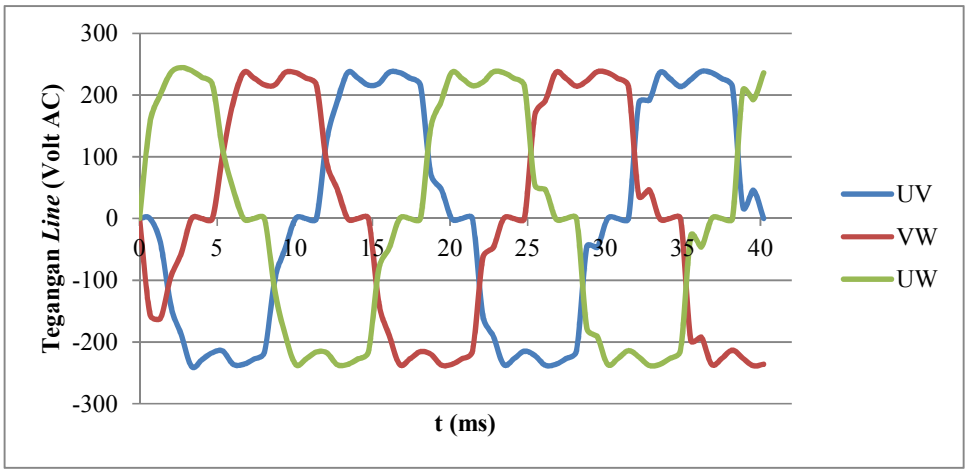
4.4.1 Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen dengan Beban R

Gambar 4.28 merupakan rangkaian berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban R sebesar 100 Ω dan untuk perbandingan dengan magnet permanen jenis Ceramic 11 sebesar 22 Ω. *Line Current U*, *Line Current V*, dan *Line Current W* merupakan keterangan alat ukur ampermeter yang digunakan mengukur arus pada generator sinkron magnet permanen. Terdapat juga 6 buah dioda yang digunakan untuk membentuk penyearah gelombang penuh 3 fasa, dengan keterangan dioda yaitu D1, D2, D3, D4, D5, dan D6. Untuk mengukur arus hasil penyearahan dipasang ampermeter pada sisi *output* penyearah yang diberi keterangan *Current*, sedangkan untuk mengukur tegangan hasil penyearahan dipasang volmeter pada sisi *output* penyearah yang diberi keterangan *Voltage*.

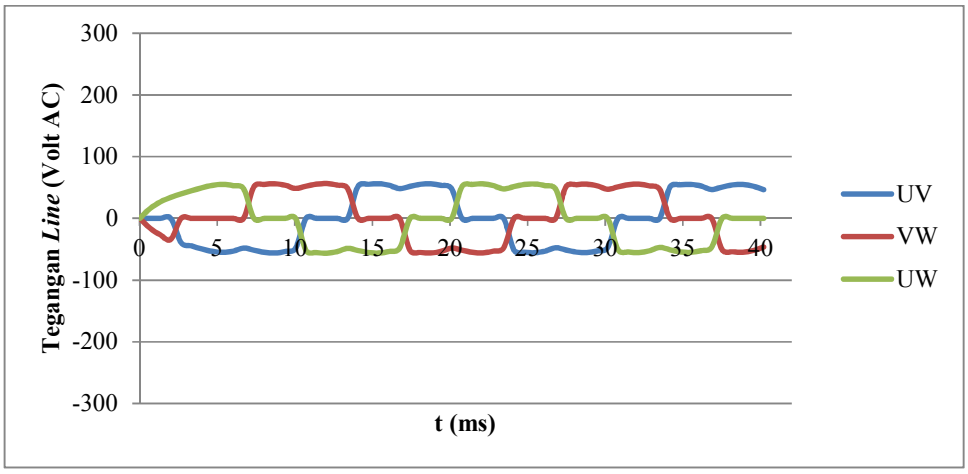


Gambar 4.28 Rangkaian simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban R

1. Tegangan Generator Sinkron Magnet Permanen pada Simulasi Berbeban



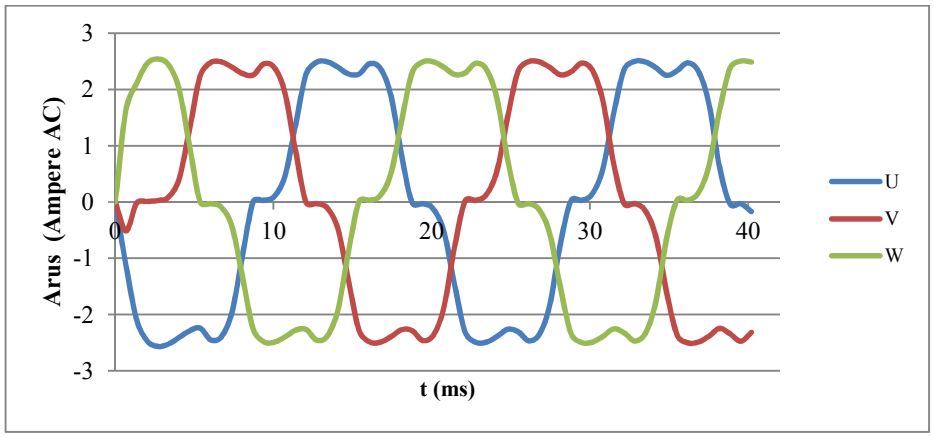
Gambar 4.29 Tegangan *line* generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



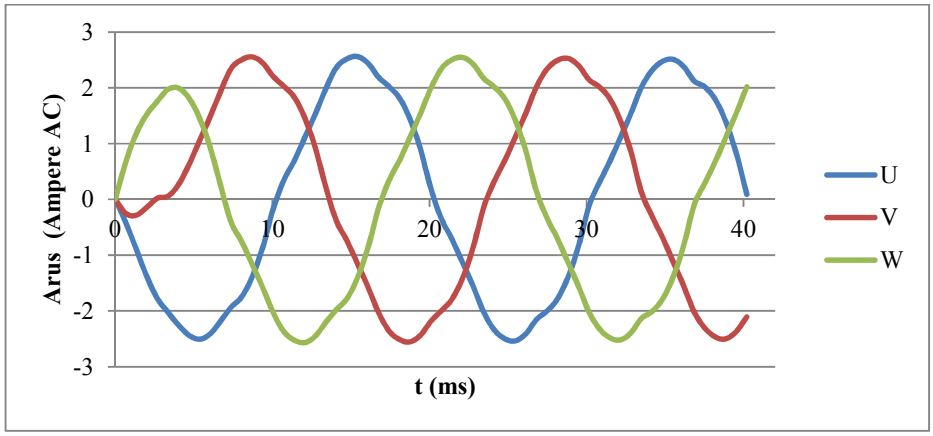
Gambar 4.30 Tegangan *line* menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

Gambar 4.29 merupakan grafik tegangan *line* generator sinkron magnet permanen setelah disearahkan menggunakan beban 100 Ω. Dari Gambar 4.29 dapat diketahui bahwa dengan menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa, gelombang *output* tegangan generator sinkron magnet permanen yang semula berbentuk gelombang sinusoidal murni, setelah dihubungkan dengan penyearah gelombang penuh 3 fasa terdapat adanya distorsi pada puncak masing-masing gelombang, dimana besar nilai tegangan *line* yang dihasilkan sebesar 226,38 Volt AC, dan tegangan fasa yang dihasilkan sebesar 135,73 Volt AC. Dan pada Gambar 4.30 merupakan grafik tegangan *line* dengan perbandingan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, dimana nilai yang dihasilkan lebih kecil dengan nilai tegangan *line* yang dihasilkan sebesar 50,77 Volt AC, dan tegangan fasa yang dihasilkan sebesar 33,16 Volt AC.

2. Arus Generator Sinkron Magnet Permanen pada Simulasi Berbeban



Gambar 4.31 Arus generator sinkron magnet dengan beban 100 Ω.



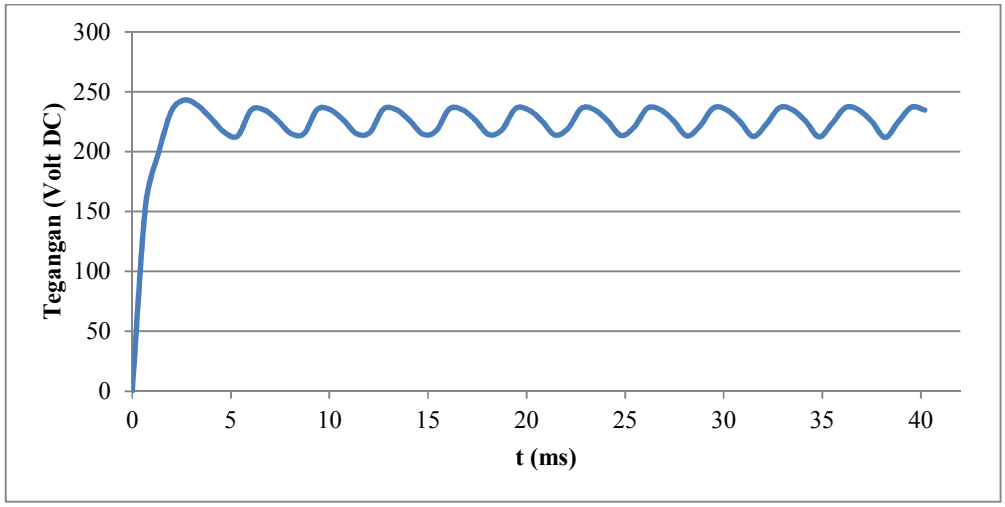
Gambar 4.32 Arus menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

Gambar 4.31 merupakan grafik arus generator sinkron magnet permanen yang mengalir pada generator setelah diberi beban sebesar 100 Ω, dan Gambar 4.32 merupakan grafik arus dengan perbandingan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 menggunakan beban 22 Ω. Dari Gambar 4.31 dan Gambar 4.32 dapat diketahui bahwa dengan menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa, gelombang *output* arus generator sinkron magnet permanen mengikuti bentuk dari gelombang *output* tegangan generator sinkron magnet permanen, yaitu terdapat distorsi pada puncak masing-masing gelombang. Arus yang dihasilkan pada Gambar 4.31 dan Gambar 4.32 adalah sama yaitu sebesar 2,24 Ampere AC (Sesuai pada Lampiran II-C dan Lampiran III-C).

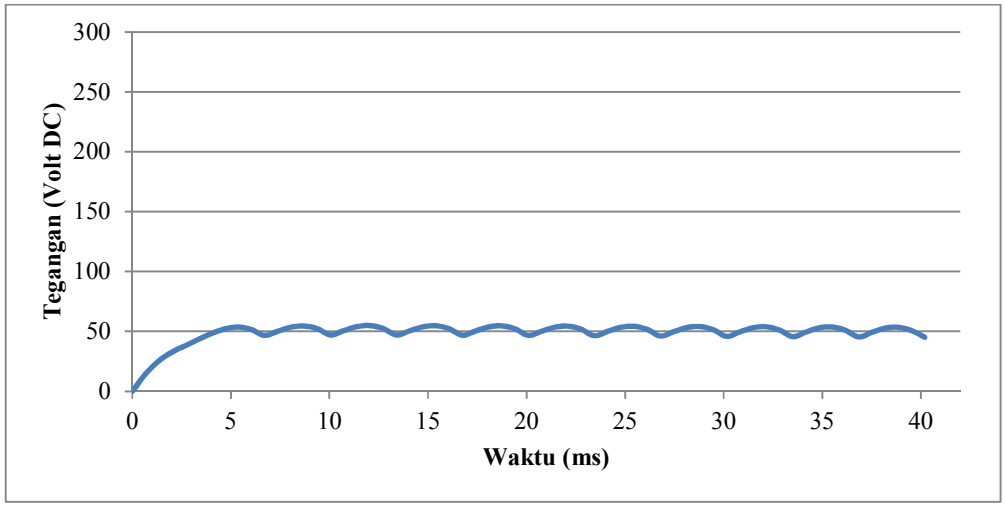
3. Tegangan Setelah Disearahkan Menggunakan Penyearah Gelombang Penuh 3 Fasa pada Simulasi Berbeban

Dengan menambahkan penyearah gelombang penuh 3 fasa pada ujung *output* generator sinkron magnet permanen, maka gelombang *output* yang semula berbentuk sinusoidal berubah bentuk menjadi gelombang seperti pada Gambar 4.33 dan Gambar 4.34, dimana terdapat 6 buah gelombang pada tegangan rata-rata. Hal ini terjadi karena dalam waktu yang sama selalu ada dua dioda yang konduksi bersamaan, sehingga pada saat siklus positif untuk masing-masing fasa menghasilkan dua buah gelombang baru hasil dari dua buah dioda yang konduksi secara bersamaan. Karena generator sinkron magnet permanen merupakan generator sinkron dengan *output* sistem 3 fasa, maka 1 gelombang penuh yang dihasilkan oleh generator sinkon magnet permanen menghasilkan 6 buah gelombang setelah disearahkan.

Gambar 4.33 menunjukkan grafik tegangan generator sinkron magnet permanen setelah disearahkan, dengan besar tegangan DC rata-rata setelah disearahkan adalah sebesar 224,96 Volt DC (sesuai pada Lampiran II-C). Kemudian pada Gambar 4.34 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 tegangan DC rata-rata setelah disearahkan yang dihasilkan sebesar 49,36 Volt DC (sesuai pada Lampiran III-C).



Gambar 4.33 Tegangan setelah disearahkan generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



Gambar 4.34 Tegangan setelah disearahkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 menggunakan beban 22 Ω.

Dengan menggunakan perhitngan maka besar tegangan DC rata-rata generator sinkron magnet permanen setelah disearahkan dapat dicari, sesuai dengan persamaan (2-7). Tegangan DC rata-rata generator sinkron magnet permanen setelah disearahkan :

$V_{dc} = 1{,}654 . E_{ph}$ (Volt DC)

$V_{dc} = 1{,}654 . 135{,}73 = 224{,}49$ (Volt DC)

Dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan tersebut, didapatkan hasil untuk masing-masing metode yang dapat dilihat pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Tegangan DC rata-rata genertor sinkron magnet permanen.

No.	Jenis Magnet Permanen	Metode	Tegangan DC rata-rata (Volt DC)	Error (%)
1.	Neodymium Iron Boron 48/11	Simulasi	224,96	0,21
		Perhitungan	224,49	
2.	Ceramic 11	Simulasi	49,36	9,99
		Perhitungan	54,84	

Dari Tabel 4.7 didapatkan data bahwa nilai tegangan DC rata-rata generator sinkron magnet permanen untuk metode simulasi dan metode perhitungan tidak begitu jauh berbeda. Dimana ditunjukkan dengan nilai persentase error yang cukup kecil, dengan menggunakan manget permanen Neodymium Iron Boron 48/11 didapatkan error sebesar 0,21% dan dengan menggunakan magnet permanen Ceramic 11 didapatkan error sebesar 9,99%.

4. Arus Setelah Disearahkan Menggunakan Penyearah Gelombang Penuh 3 Fasa pada Simulasi Berbeban

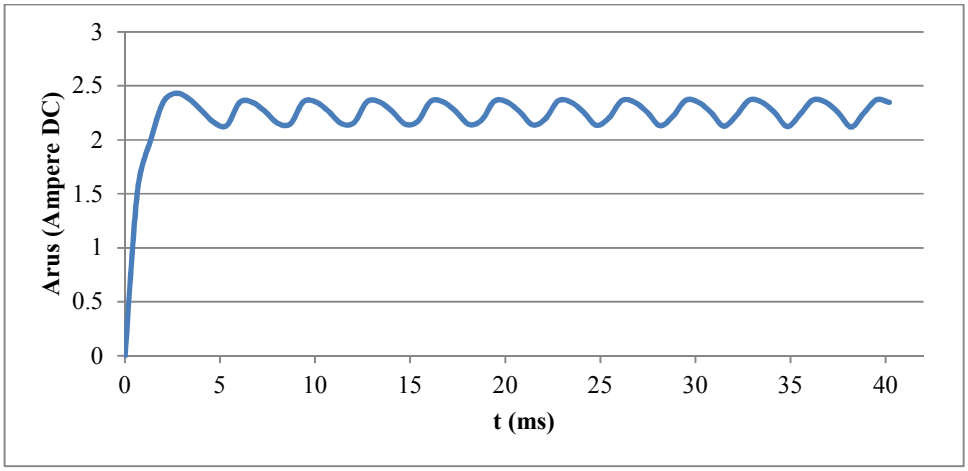
Adanya beban pada sisi *output* penyearah menghasilkan arus yang mengalir pada rangkaian, karena rangkaian yang semula berupa rangkaian terbuka berubah menjadi rangkaian tertutup. Arus yang muncul merupakan hasil bagi antara tegangan rata-rata setelah disearahkan dengan beban yang digunakan.

Gambar 4.35 menunjukkan grafik arus DC generator sinkron magnet permanen setelah disearahkan, dimana besar arus DC rata-rata setelah disearahkan adalah 2,24 Ampere dengan menggunakan beban sebesar 100 Ω (sesuai pada Lampiran II-C). Kemudian Gambar 4.36 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 arus DC rata-rata setelah disearahkan yang dihasilkan juga sama yaitu sebesar 2,24 Ampere dengan menggunakan beban sebesar 22 Ω (sesuai pada Lampiran III-C).

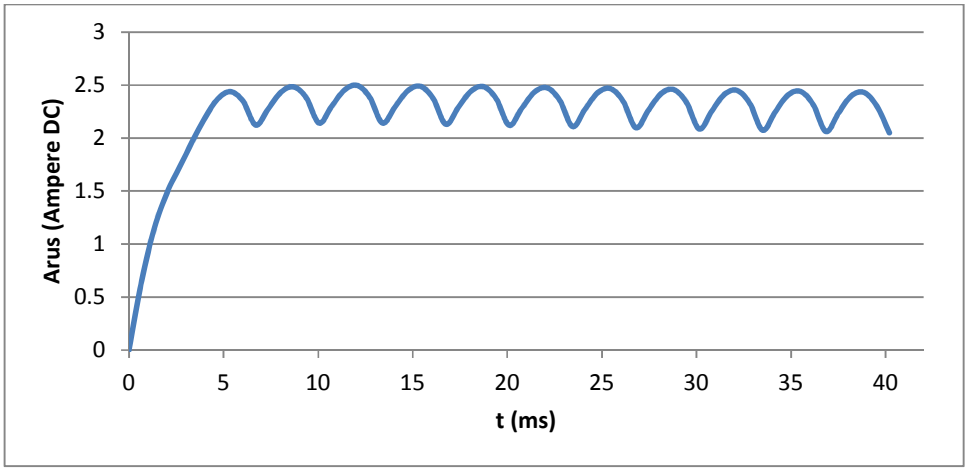
Dengan menggunakan persamaan (2-8), arus DC rata-rata generator sinkron magnet permanen setelah disearahkan dapat dicari. Arus generator sinkron magnet permanen menggunakan magnet permanen setelah disearahkan menggunakan penyerah gelombang penuh 3 fasa :

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{3}.E_{ph}}{R} \quad \text{(Ampere DC)}$$

$$I_{dc} = \frac{\sqrt{3}.135,04}{100} = 2,34 \quad \text{(Ampere DC)}$$



Gambar 4.35 Arus setelah disearahkan generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



Gambar 4.36 Arus setelah disearahkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

Dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan tersebut, didapatkan hasil untuk masing-masing metode yang dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Arus DC rata-rata genertor sinkron magnet permanen.

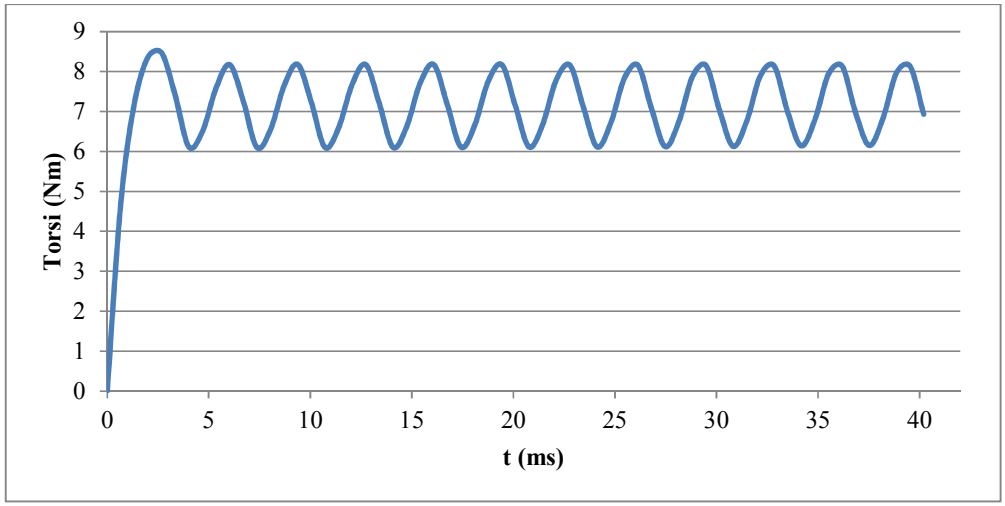
No.	Jenis Magnet Permanen	Metode	Arus DC rata-rata (Amp)	Error (%)
1.	Neodymium Iron Boron 48/11	Simulasi	2,24	4,27
		Perhitungan	2,34	
2.	Ceramic 11	Simulasi	2,24	14,17
		Perhitungan	2,61	

Dari Tabel 4.8 didapatkan data bahwa nilai arus DC rata-rata generator sinkron magnet permanen untuk metode simulasi dan metode perhitungan tidak begitu jauh berbeda. Dimana ditunjukkan dengan nilai persentase error yang cukup besar, dengan

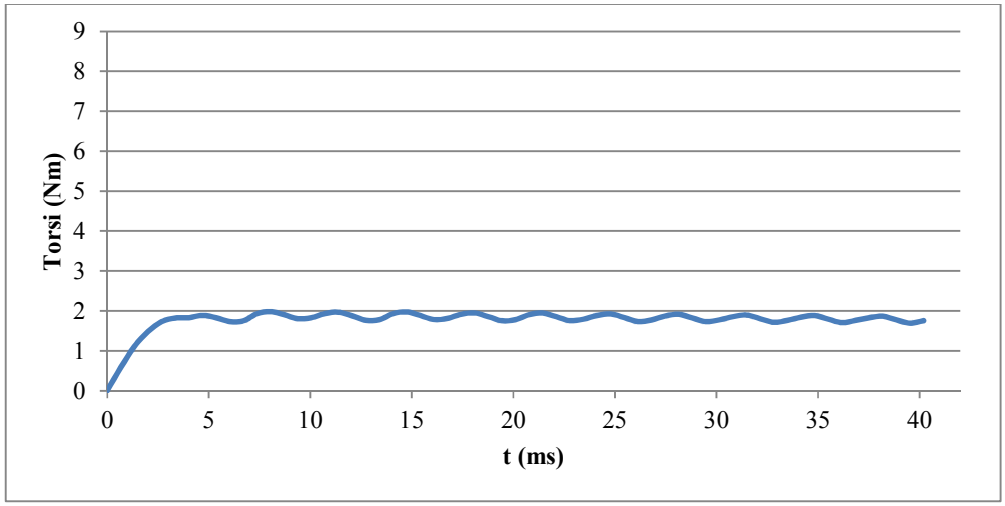
menggunakan manget permanen Neodymium Iron Boron 48/11 didapatkan error sebesar 4,27% dan dengan menggunakan magnet permanen Ceramic 11 didapatkan error sebesar 14,17%.

5. Torsi pada Generator Sinkron Magnet Permanen

Gambar 4.37 merupakan grafik torsi generator sinkron magnet, besar nilai rata-rata torsi pada generator sinkron magnet permanen adalah sebesar 7,17 Nm (sesuai pada Lampiran II-C), kemudian pada Gambar 4.38 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 besar nilai torsi generator sinkron magnet permanen yang dihasilkan sebesar 1,79 Nm (sesuai pada Lampiran III-C).



Gambar 4.37 Torsi generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



Gambar 4.38 Torsi menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

Untuk mendapatkan besar nilai rata-rata torsi dengan menggunakan metode perhitungan dapat dicari dengan Persamaan (2-25) sampai (2-28) :

$$\omega = \frac{n.2\pi}{60}$$

$$\omega = \frac{750.2\pi}{60} = 78{,}54 \quad (rad/\sec)$$

Nilai rata-rata torsi generator sinkron magnet permanen adalah :

$$K_e = \frac{V_{dc}}{\omega}$$

$$K_e = K_T = \frac{223{,}36}{78{,}54} = 2{,}84$$

$$T = K_t.I_{dc} \qquad (Nm)$$

$$T = 2{,}84.2{,}34 = 6{,}64 \quad (Nm)$$

Dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan tersebut, didapatkan hasil untuk masing-masing metode yang dapat dilihat pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Torsi rata-rata genertor sinkron magnet permanen.

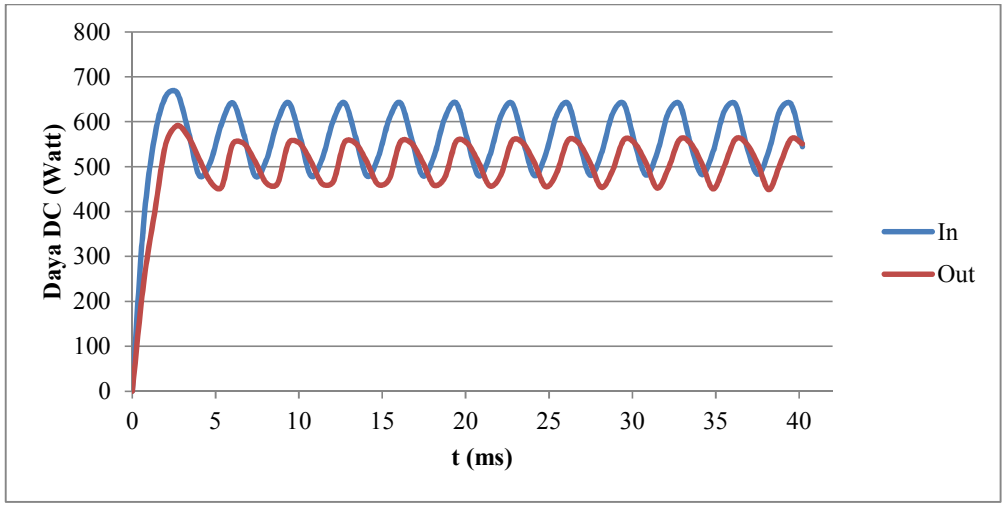
No.	Jenis Magnet Permanen	Metode	Torsi rata-rata (Nm)	Error (%)
1.	Neodymium Iron Boron 48/11	Simulasi	7,17	7,98
		Perhitungan	6,64	
2.	Ceramic 11	Simulasi	1,79	1,64
		Perhitungan	1,82	

Dari Tabel 4.9 didapatkan data bahwa nilai torsi rata-rata generator sinkron magnet permanen untuk metode simulasi dan metode perhitungan tidak begitu jauh berbeda. Dimana ditunjukkan dengan nilai persentase error yang cukup keci, torsi yang dihasilkan pada generator sinkron magnet permanen sebesar 7,98%, dan dengan perbandingan menggunakan magnet permanen Ceramic 11 didapatkan error sebesar 1,64%.

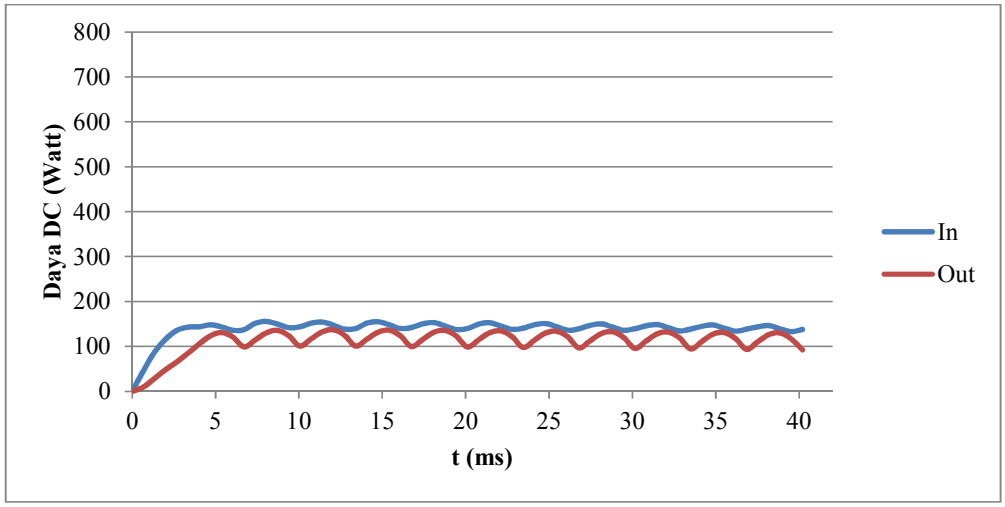
Dari hasil simulasi dan perhitungan tersebut, dapat dilihat perbedaan nilai rata-rata torsi yang dibutuhkan oleh generator sinkron magnet permanen. Perbedaan nilai rata-rata torsi generator sinkron magnet permanen terdapat pada besar nilai konstanta torsi (K_T), dimana nilai konstanta torsi ini sendiri dipengaruhi oleh besarnya nilai dari tegangan yang dibangkitkan oleh generator sinkron magnet permanen dimana besar nilai tegangan yang dibangkitkan dipengaruhi oleh jenis magnet permanen yang

digunakan. Generator sinkron magnet permanen jenis magnet permanen menghasilkan tegangan yang lebih besar dari pada dengan perbandingan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11. Sehingga pada Gambar 4.37 yaitu grafik torsi generator sinkron magnet permanen menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan dengan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 yang sesuai pada Gambar 4.38.

6. Daya pada Generator Sinkron Magnet Permanen



Gambar 4.39 Daya *input* dan daya *output* generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



Gambar 4.40 Daya *input* dan daya *output* menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

Dengan menggunakan penyearah gelombang penuh 3 fasa dan dihasilkannya tegangan dan juga arus pada rangkaian, maka daya yang mampu dibangkitkan oleh

generator sinkron magnet permanen dapat diperoleh. Daya input pada generator sinkron magnet permanen merupakan daya yang dibutuhkan untuk memutar generator sinkron magnet permanen, yang merupakan hasil perkalian antara torsi (N_m) generator sinkron magnet permanen dengan kecepaatan putar (rad/s) generator sinkron magnet permanen, sedangkan daya output merupakan daya yang mampu dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen yang merupakan perkalian antara tegangan DC rata-rata (V_{dc}) setelah disearahkan dengan arus DC rata-rata (I_{dc}) setelah disearahkan.

Dari hasil simulasi besar nilai daya input rata-rata generator sinkron magnet permanen adalah sebesar 563,37 Watt, dan daya output rata-rata yang dihasilkan adalah sebesar 507,80 Watt (sesuai pada Lampiran II-C). kemudian dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, daya input rata-rata yang dihasilan sebesar 140,86 Watt, dan daya output rata-rata yang dihasilkan sebesar 112,90 Watt (sesuai pada Lampiran III-C).

Dengan menggunakan persamaan (2-29) dan (2-30), besar nilai rata-rata daya input yang dibutuhkan oleh generator sinkron magnet permanen dan daya output yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen dapat dihitung :

$$P_{in} = T.\omega \qquad (Watt)$$

$$P_{in} = 6{,}64.78{,}54 = 522{,}66 \qquad (Watt)$$

$$P_{out} = V.I \qquad (Watt)$$

$$P_{out} = 223{,}36.2{,}34 = 521{,}51 \qquad (Watt)$$

Dengan didapatkan daya input dan juga daya output pada generator sinkron magnet permanen, maka efisiensi kerja dari generator sinkron magnet permanen dapat dihitung. Efisiensi kerja yang mampu dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen :

$$\eta_{perhitungan} = \frac{P_{out}}{P_{in}}.100\%$$

$$\eta_{perhitungan} = \frac{521{,}51}{522{,}66}.100\% = 99{,}87\%$$

Dengan menggunakan metode simulasi dan perhitungan tersebut, didapatkan hasil untuk masing-masing metode yang dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10. Daya input dan daya output pada generator sinkron magnet permanen.

No.	Jenis Magnet Permanen	Metode	Daya (Watt)		Efisiensi kerja (%)
			Input	*Output*	
1.	Neodymium Iron Boron 48/11	Simulasi	563,37	507,80	90,13
		Perhitungan	522,66	521,51	99,77
2.	Ceramic 11	Simulasi	140,86	112,90	80,15
		Perhitungan	142,94	122,84	85,94

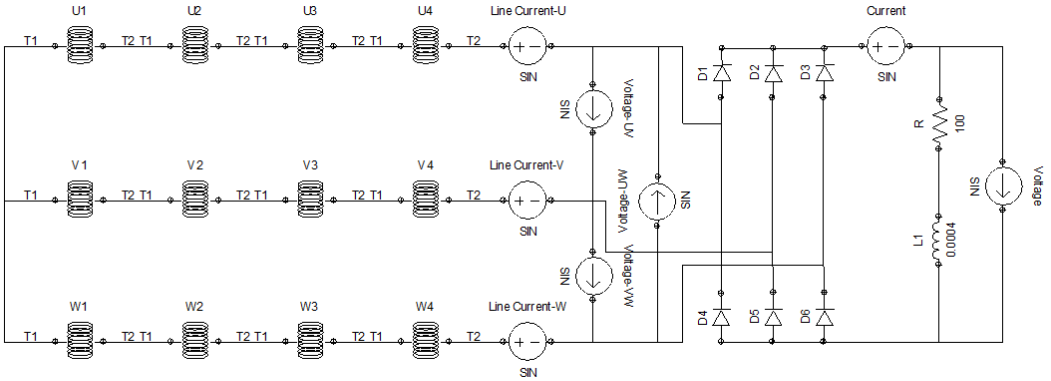
Pada Tabel 4.10 didapatkan data bahwa genetator sinkron magnet permanen mampu menghasilkan daya *output* sesuai dengan yang diinginkan yaitu menghasilkan daya *output* sebesar 507,8 Watt, berbeda dengan perbandingan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 daya *output* yang dihasilkan lebih kecil sebesar 112,90 Watt. Untuk efisiensi kerja generator sinkron magnet permanen cukup tinggi yaitu sebesar 90,13%, dengan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 efisiensi kerja generator sinkron magnet permanen sebesar 80,15%

Perbedaan hasil daya *output* generator sinkron magnet permanen jenis magnet permanen Neodymium Iron Boron dan Ceramic 11 disebabkan oleh nilai fluks remanensi (B_r) yang dimiliki masing-masing magnet permanen. Dengan semakin besarnya nilai fluks remanensi pada magnet permanen tentu saja generator sinkron magnet permanen mampu menghasilkan tegangan dan juga daya output yang lebih besar, seperti pada magnet permanen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 yang memiliki nilai fluks remanensi senilai 1.375 Tesla, sedangkan magnet permanen jenis Ceramic 11 yang memiliki nilai fluks remanensi yang lebih kecil yaitu dengan nilai 0.42 tentu akan menghasilkan nilai tegangan, arus, dan juga daya *output* jauh dari yang diharapkan.

4.4.2 Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen dengan Beban R dan L

Gambar 4.41 merupakan rangkaian berbeban dengan beban R dan beban L. Beban yang digunakan berupa beban R dan L dipasang seri pada sisi *output* penyearah dengan nilai R adalah 100 Ω, sedangkan L bernilai 0,4 mH, 1 mH, dan 20 mH. *Line Current U*, *Line Current V*, dan *Line Current W* merupakan keterangan alat ukur ampermeter yang digunakan mengukur arus pada generator sinkron magnet permanen. Terdapat juga 6 buah dioda yang digunakan untuk membentuk penyearah gelombang penuh 3 fasa, dengan keterangan dioda yaitu D1, D2, D3, D4, D5, dan D6. Untuk

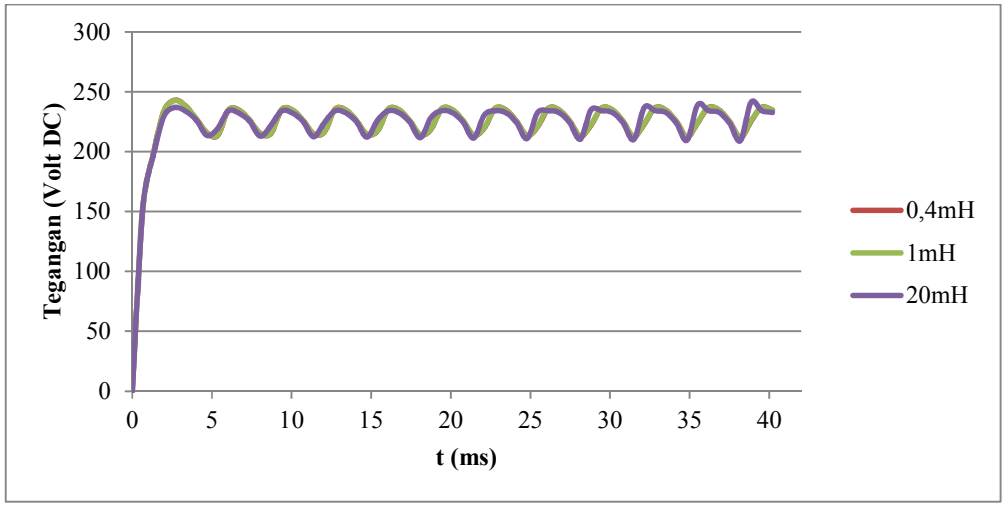
mengukur arus hasil penyearahan dipasang ampermeter pada sisi *output* penyearah yang diberi keterangan *Current*, sedangkan untuk mengukur tegangan hasil penyearahan dipasang volmeter pada sisi *output* penyearah yang diberi keterangan *Voltage*.



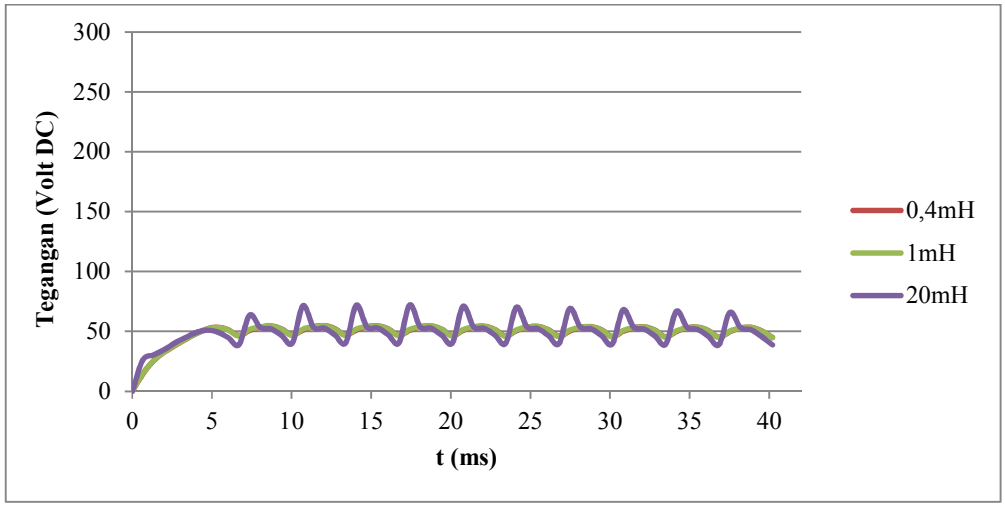
Gambar 4.41 Rangkaian simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban R dan beban L

1. Tegangan pada Beban R dan L Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen

Pada simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen juga dilakukan dengan menambahkan beban L, yaitu sebesar 0,4 mH, 1 mH, dan 20 mH. Dari Gambar 4.42 dapat dilihat bahwa dengan menambahkan beban L (0,4 mH, 1 mH, dan 20 mH) *output* gelombang tegangan DC yang dihasilkan tidak terlalu jauh berbeda, tetapi memiliki perbedaan pada nilai amplitudo gelombang tegangan yang dihasilkan. Adapun nilai tegangan DC rata-rata yang dihasilkan dengan penambahan beban L sebesar 0,4 mH sebesar 224,96 Volt DC, untuk penambahan beban L sebesar 1 mH menghasilkan tegangan DC rata-rata sebesar 224,97 Volt DC, dan dengan menambahkan beban L sebesar 20 mH menghasilkan tegangan DC rata-rata sebesar 225,27 Volt DC (sesuai pada Lampiran II-D). Kemudian pada Gambar 4.43 dengan membandingkan menggunakna magnet permanen jenis Ceramic 11, dengan menambahkan beban L sebesar 0,4 mH menghasilkan tegangan DC rata-rata sebesar 49,39 Volt DC, untuk penambahan beban L sebesar 1 mH menghasilkan tegangan DC rata-rata sebesar 49,43 Volt DC, dan dengan penambahan beban L sebesar 20 mH menghasilkan tegangan DC sebesar 50,35 Volt DC (sesuai pada Lampiran III-D).



Gambar 4.42 Tegangan DC dari kombinasi jenis beban R dan L pada simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.

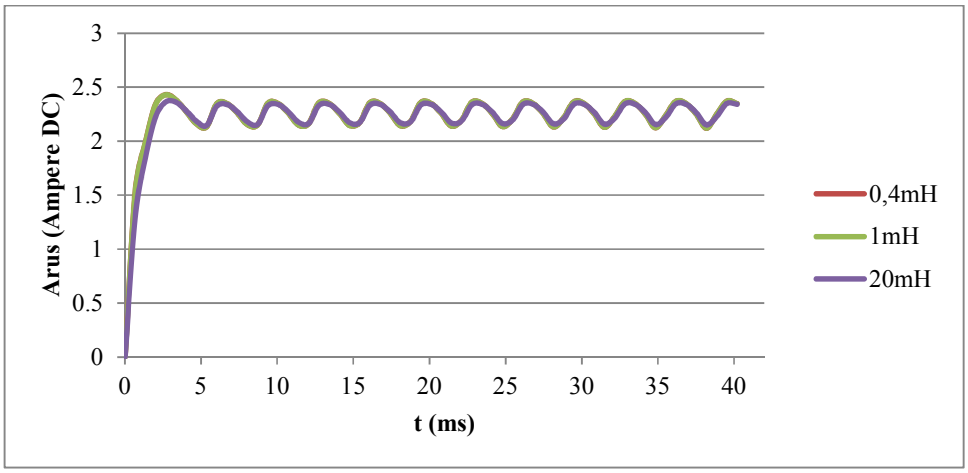


Gambar 4.43 Tegangan DC dari kombinasi jenis beban R dan L menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

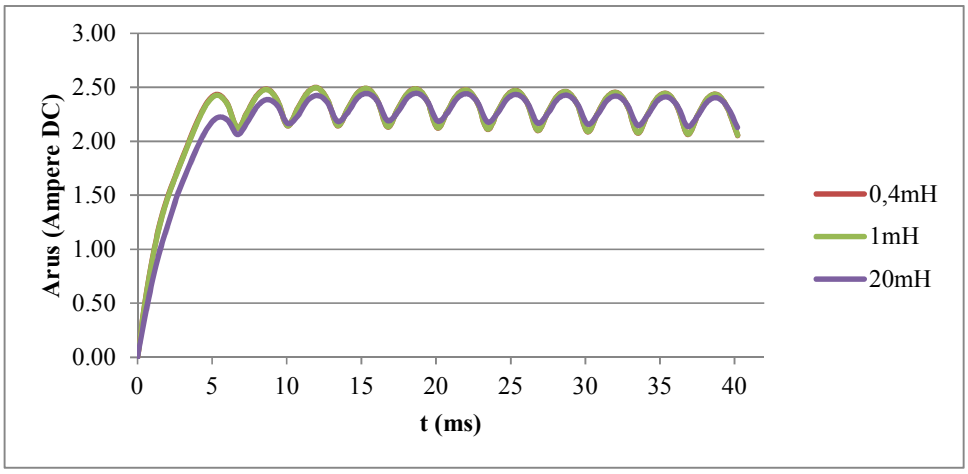
2. Arus pada Beban R dan L Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen

Pada Gambar 4.44 yang menunjukkan grafik arus DC hasil simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban R dan beban L, didapatkan data bahwa besar arus DC rata-rata yang dihasilkan dengan penambahan beban L sebesr 0,4 mH maka didapatkan arus DC rata-rata sebesar 2,25 Ampere DC, dengan penambahan beban L sebesar 1 mH maka didapatkan arus DC rata-rata sebesar 2,25 Ampere DC, dan dengan penambahan beban L sebesar 20 mH maka didapatkan arus DC rata-rata sebesar 2,24 Ampere DC (sesuai pada Lampiran II-D).

Kemudian pada Gambar 4.45 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, didapatkan data bahwa besar arus DC rata-rata yang dihasilkan dengan penambahan beban L sebesr 0,4 mH, 1 mH maka didapatkan arus DC rata-rata sebesar 2,24 Ampere DC, dan dengan penambahan beban L sebesar 20 mH maka didapatkan arus DC rata-rata sebesar 2,20 Ampere DC (sesuai pada Lampiran III-D).



Gambar 4.44 Arus DC dari kombinasi jenis beban R dan L pada simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban 100Ω.

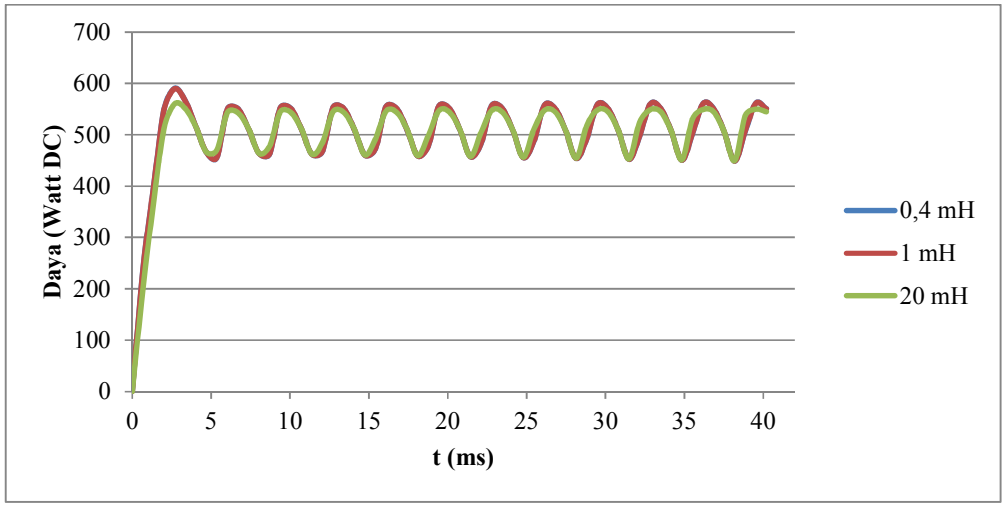


Gambar 4.45 Arus DC dari kombinasi jenis beban R dan L menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

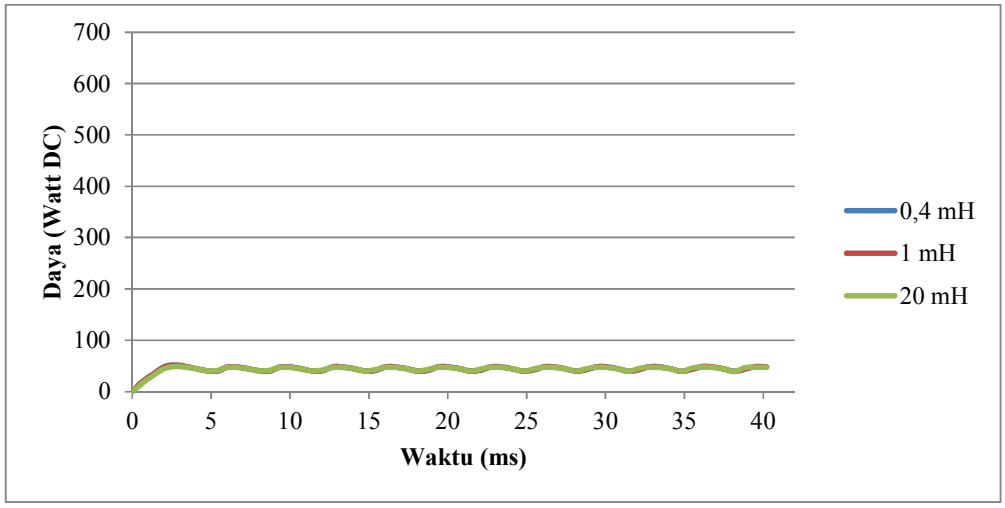
3. Daya pada Beban R dan L Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen

Pada Gambar 4.46 yang menunjukkan grafik daya output hasil simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban R dan beban L, didapatkan

data bahwa besar daya output rata-rata yang dihasilkan dengan penambahan beban L sebesr 0,4 mH maka didapatkan daya *output* rata-rata sebesar 507,79 Watt, dengan penambahan beban L sebessar 1 mH maka didapatkan daya *output* rata-rata sebesar 507,75 Watt, dan dengan penambahan beban L sebesar 20 mH maka didapatkan daya *output* rata-rata sebesar 506,39 Watt (sesuai pada Lampiran II-D).



Gambar 4.46 Daya *output* dari kombinasi jenis beban R dan L pada simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω



Gambar 4.47 Daya *output* dari kombinasi jenis beban R dan L menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

Kemudian pada Gambar 4.47 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, didapatkan data bahwa besar daya *output* rata-rata yang dihasilkan dengan penambahan beban L sebesr 0,4 mH maka didapatkan daya *output* rata-rata sebesar 112,94 Watt, dengan penambahan beban L sebesar 1 mH menghasilkan

daya *output* rata-rata sebesar 112,95 Watt, dan dengan penambahan beban L sebesar 20 mH maka didapatkan daya *output* rata-rata sebesar 112,59 Watt (sesuai pada Lampiran III-D). Perbandingan nilai tegangan DC rata-rata, arus DC rata-rata, dan Daya *output* rata-rata untuk masing-masing kombinasi beban R dan L dapat dilihat pada Tabel 4.11.

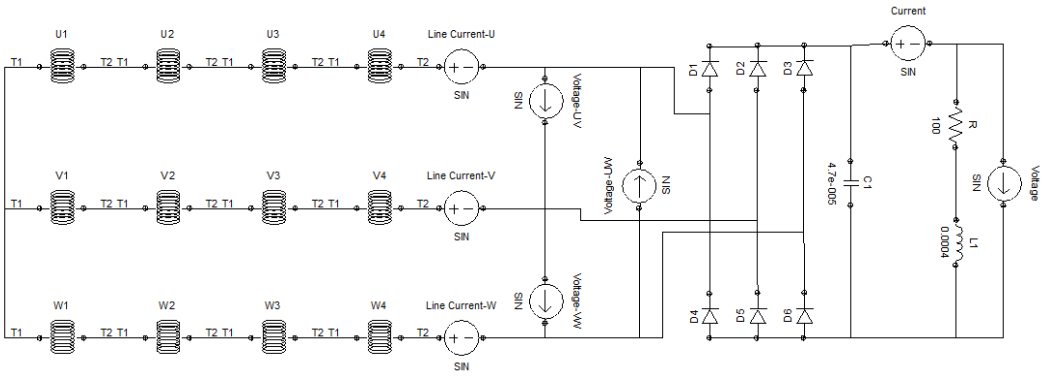
Tabel 4.11 Perbandingan teganan DC, arus DC dan daya *output* rata-rata dengan beban R dan L pada simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen.

No.	Magnet Permanen	Beban		V_{DC} rata-rata (Volt DC)	I_{DC} rata-rata (Volt DC)	Daya output rata-rata (Watt DC)
		R (Ω)	L (mH)			
1.	Neodymium Iron Boron 48/11	100	0,4	224,96	2,25	507,79
			1	224,97	2,25	507,75
			20	225,27	2,24	506,39
2.	Ceramic 11	22	0,4	49,39	2,24	112,94
			1	49,43	2,24	112,95
			20	50,35	2,20	112,59

Dari Tabel 4.11 dapat diketahui bahwa penambahan nilai beban L sebesar 0,4 mH, 1 mH, dan 20 mH menghasilkan bentuk gelombang *output* yang dibuktikan dengan besar tegangan DC, arus DC, dan daya *output* yang dihasilkan bernilai tidak berbeda jauh.

4.5 Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen dengan Penambahan Filter C

4.5.1 Simulasi Berbeban Generator Sinkron Magnet Permanen pada Beban R 100Ω dengan Penambahan Filter



Gambar 4.48 Rangkaian simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan filter C

Untuk mendapatkan *output* gelombang yang lebih bagus, maka pada rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa dipasang filter C, dimana filter C tersebut dipasang paralel dengan beban R atau dengan kombinasi beban R dan beban L.

Untuk menentukan nilai dari filter C yang digunakan, maka dapat dicari menggunakan Persamaan (2-31) sampai (2-32) :

$$r = \frac{V_{(rms)}}{V_{dc}}.100\% = \frac{2,4.I_{dc}}{C.V_{dc}}.100\% = \frac{2,4}{R_L.C}.100\%$$

$$C = \frac{2,4}{R_L.r} \ (\mu F)$$

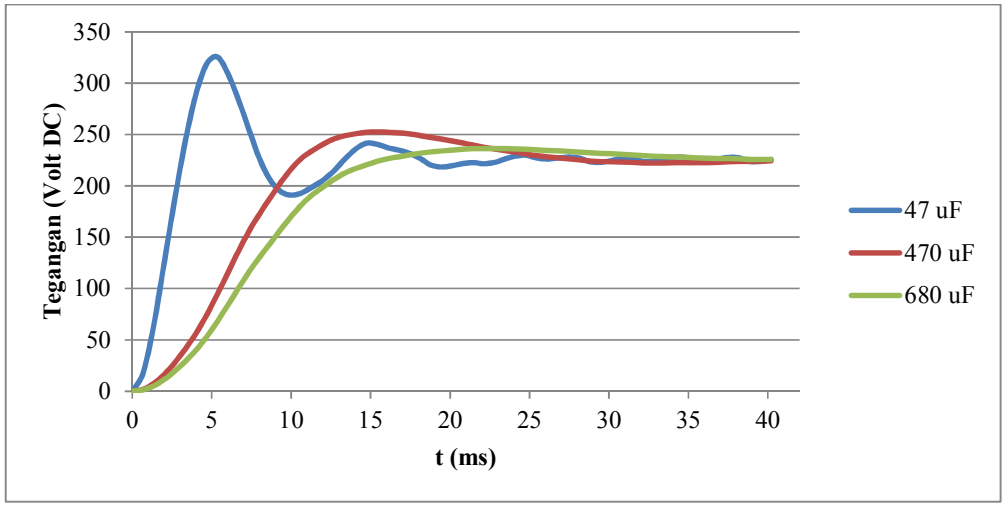
$$C = \frac{2,4}{100.0,05} = 0,48 \ (\mu F)$$

$$C = \frac{2,4}{22.0,05} = 2,18 \ (\mu F)$$

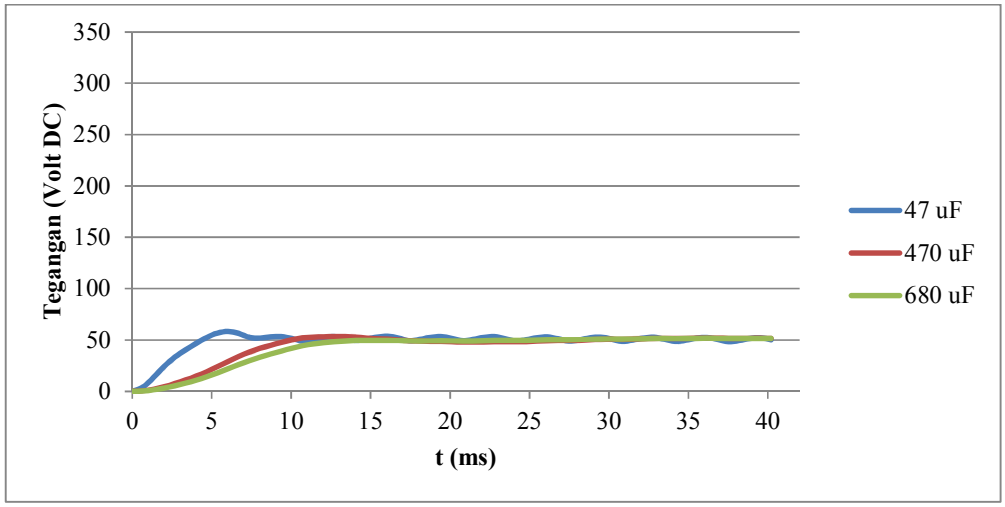
Nilai Kapasitor (C) yang didapatkan merupakan nilai minimum dari nilai kapasitor yang digunakan pada rangkaian penyearah gelombang penuh 3 fasa, sehingga dipilih nilai kapasitor sebesar 47 µF, 470 µF, dan juga 680 µF.

1. Tegangan pada Masing-masing Filter pada Simulasi Berbeban Magnet Permanen Beban R

Dari Gambar 4.49 dapat dilihat bahwa pada beban R dengan menambahkan filter C sebesar 47 µF, 470 µF, dan 680 µF menghasilkan bentuk gelombang *output* tegangan DC yang berbeda, dimana dengan menggunakna filter C sebesar 680 µF meghasilkan bentuk gelombang yang paling stabil karena *overshoot* yang dihasilkan paing kecil. Dengan menggunakan filter C sebesar 47 µF gelombang *output* tegangan DC menghasilkan *overshoot* sebesar 325,57 Volt DC pada waktu 5,36 ms dan mencapai waktu s*teady state* pada waktu 18,09 ms dengan besar 227,00 Volt DC, kemudian dengan menggunakan filter C sebesar 470 µF gelombang *output* tegangan DC menghasilkan *overshoot* sebesar 252,56 Volt DC pada waktu ms 15,41 ms dan mencapai *steady state* pada waktu 27,47 ms dengan besar 226,32 Volt DC, dan dengan menggunakan filter C sebesar 680 µF gelombang output tegangan DC menghasilkan *overshoot* sebesar 236,30 Volt DC pada waktu 22,11 dan mencapai waktu *steady state* pada waktu 36,18 ms dengan besar 226,88 Volt DC (sesuai pada Lampiran II-E.1).



Gambar 4.49 Perbandingan tegangan DC pada masing-masing filter dengan beban R simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.

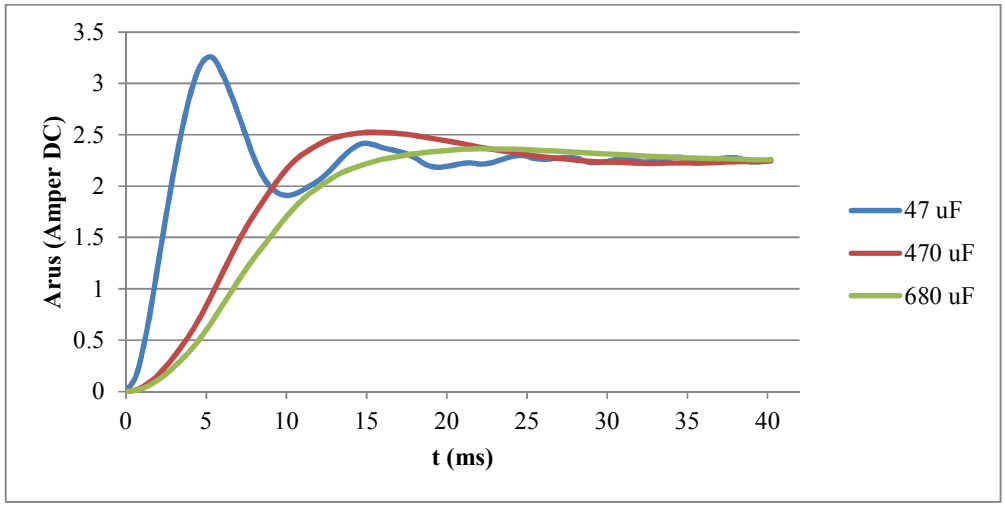


Gambar 4.50 Perbandingan tegangan DC pada masing-masing filter menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

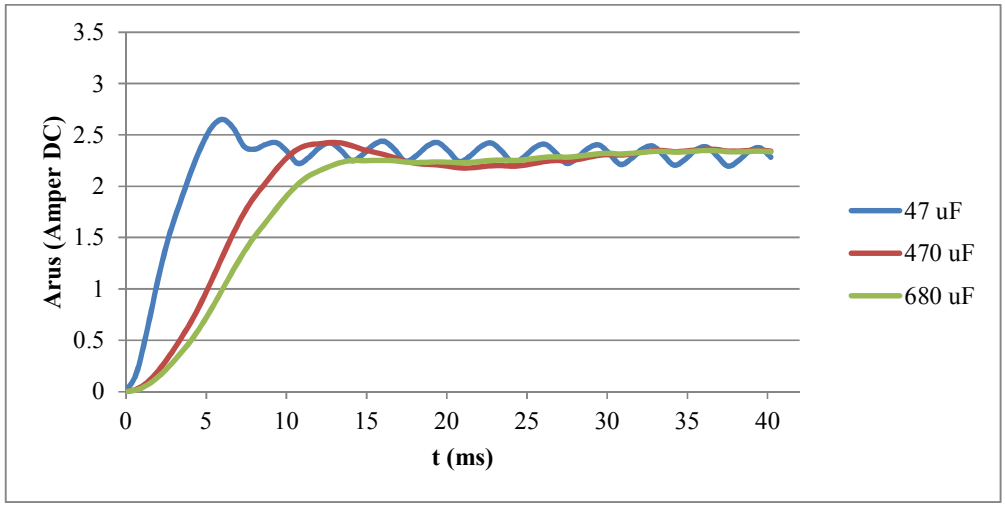
Kemudian pada Gambar 4.50 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, dengan menggunakan filter C sebesar 47 µF gelombang *output* tegangan DC menghasilkan *overshoot* sebesar 58,33 Volt DC pada waktu 5,36 ms dan mencapai waktu s*teady state* pada waktu 18,09 ms dengan besar tengangan 50,53 Volt DC, kemudian dengan menggunakan filter C sebesar 470 µF gelombang *output* tegangan DC menghasilkan *overshoot* sebesar 53,34 Volt DC pada waktu 15,41 ms dan mencapai *steady state* pada waktu 27,47 ms dengan besar tegangan 48,91 Volt DC, dan dengan menggunakan filter C sebesar 680 µF gelombang output tegangan DC menghasilkan *overshoot* sebesar 51,26 Volt DC pada waktu 22,11 ms dan mencapai

waktu *steady state* pada waktu 36,18 ms dengan besar tegangan 49,93 Volt DC (sesuai pada Lampiran III-E.1).

2. Arus pada Masing-masing Filter pada Simulasi Berbeban Magnet Permanen Beban R



Gambar 4.51 Perbandingan arus DC pada Masing-masing filter dengan beban R simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



Gambar 4.52 Perbandingan arus DC pada masing-masing filter menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

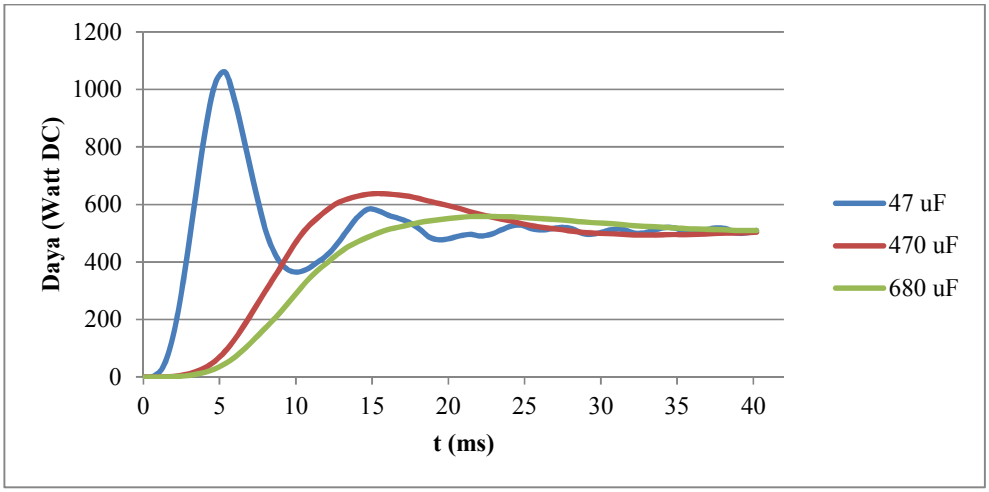
Pada Gambar 4.51 yang merupakan grafik arus DC dengan penambahan filter C pada simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan menambahkan filter C sebesar 47 μF gelombang arus DC menghasilkan overshoot sebesar 3,26 Ampere pada waktu 5,36 ms dan mencapai waktu s*teady state* pada waktu 18,09 ms

dengan besar 2,27 ampere, kemudian dengan menggunakan filter C sebesar 470 μF gelombang *output* arus DC menghasilkan *overshoot* sebesar 2,53 Ampere pada waktu 15,41 ms dan mencapai *steady state* pada waktu 27,47 ms dengna besar 2,26 ampere, dan dengan menggunakan filter C sebesar 680 μF gelombang output arus DC menghasilkan *overshoot* sebesar 2,36 ampere pada waktu 20,77 ms dan mencapai waktu *steady state* pada waktu 36,18 ms dengan besar 2,27 ampere (sesuai pada Lampiran III-E.1).

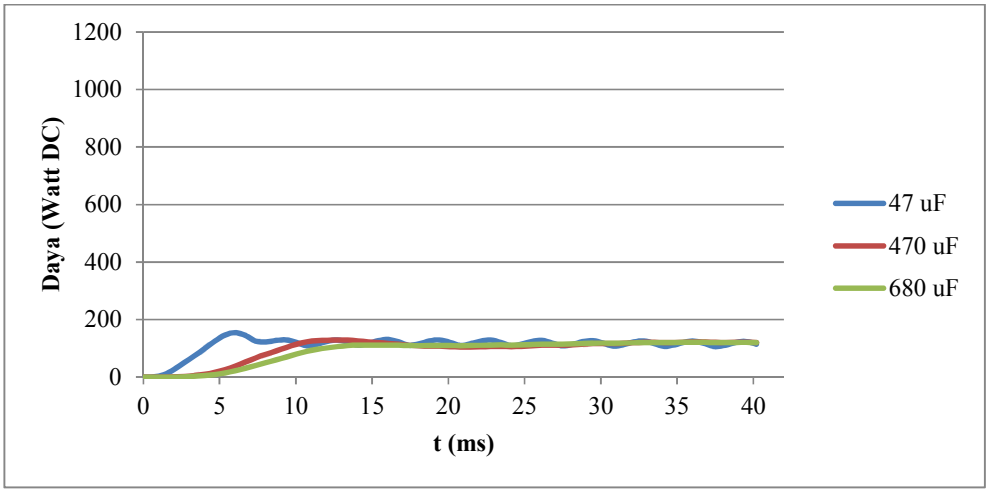
Kemudian pada Gambar 4.52 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, dengan menambahkan filter C sebesar 47 μF gelombang arus DC menghasilkan *overshoot* sebesar 2,65 ampere DC pada waktu 5,36 ms dan mencapai waktu s*teady state* pada waktu 18,09 ms dengan besar 2,24 ampere DC, kemudian dengan menggunakan filter C sebesar 470 μF gelombang *output* arus DC menghasilkan *overshoot* sebesar 2,42 Ampere DC pada waktu 14,74 ms dan mencapai *steady state* pada waktu 27,47 ms dengan besar 2,24 Ampere DC, dan dengan menggunakan filter C sebesar 680 μF gelombang output arus DC menghasilkan *overshoot* sebesar 2,35 Amperr DC pada waktu 20,77 ms dan mencapai waktu *steady state* pada waktu 36,18 ms dengan besar 2,24 Ampere DC (sesuai pada Lampiran III-E.1).

3. Daya *Output* pada Masing-masing Filter pada Simulasi Berbeban Magnet Permanen Beban R

Gambar 4.53 yang merupakan grafik perbandingan daya *output* pada masing-masing filter dengan beban R pada simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen, dapat diketahui bahwa dengan menggunakan filter C sebesar 47 μF menghasilkan *overshoot* sebesar 1059,96 Watt pada waktu 5,36 ms dan mampu mencapai *steady state* pada waktu 18,09 ms dengan besar 515,30 Watt, kemudian dengan menggunakan filter C sebesar 470 μF menghasilkan *overshoot* sebesar 637,88 Watt pada waktu 15,41 ms dan mencapai *steady state* pada waktu 27,47 ms dengan besar 512,20 Watt , dan dengan menggunakan filter C sebesar 680 μF menghasilkan *overshoot* sebesar 557,95 Watt pada waktu 22,78 ms dan mencapai waktu *steady state* pada waktu 36,18 ms dengan besar 514,70 Watt (sesuai pada Lampiran III-E.1).



Gambar 4.53 Perbandingan daya *output* pada masing-masing filter dengan beban R simulasi berbeban generator sinkron magnet permanen dengan beban 100 Ω.



Gambar 4.54 Perbandingan arus DC pada masing-masing filter menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11 dengan beban 22 Ω.

Kemudian pada Gambar 4.54 dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, dapat diketahui bahwa dengan menggunakan filter C sebesar 47 µF menghasilkan *overshoot* sebesar 154,66 Watt pada waktu 5,36 ms dan mampu mencapai *steady state* pada waktu 18,09 ms dengan besar 120,29 Watt, kemudian dengan menggunakan filter C sebesar 470 µF menghasilkan *overshoot* sebesar 129,33 Watt pada waktu 15,41 ms dan mencapai *steady state* pada waktu 27,47 ms dengan besar 110,68 Watt, dan dengan menggunakan filter C sebesar 680 µF menghasilkan *overshoot* sebesar 120,39 Watt pada waktu 22,78 ms dan mencapai waktu *steady state* pada waktu 36,18 ms dengan besar 111,39 Watt (sesuai pada Lampiran III-E.1).

Untuk menentukan nilai persentase *overshoot* (%Mp) didapatkan menggunakan perhitungan :

$$\%Mp = \frac{V_p - V_{ss}}{V_{ss}}.100\%$$

$$\%Mp = \frac{325{,}27 - 227}{227}.100\% = 43{,}42\%$$

Untuk hasil tegangan DC, dan arus DC pada kombinasi beban R dan L yang lain dapat dilihat selengkapnya pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Perbandingan tegangan DC *steady state* dan *overshot* pada kombinasi beban R dan L

No.	Magnet Permanen	Jenis Beban	Filter (μF)	*Overshoot*		*Steady State*		*%Mp* (%)
				Vp (Volt)	t (ms)	Vss (Vp)	t (ms)	
1.	NdFeB 48/11	R = 100 Ω	47	325,57	5,36	227,00	18,09	43,42
			470	252,56	15,41	226,32	27,47	11,59
			680	236,30	22,11	226,88	36,18	4,15
		R = 100 Ω, L = 0,4 mH	47	325,56	5,36	226,96	18,09	43,44
			470	252,57	15,41	226,32	27,47	11,60
			680	236,11	22,11	226,88	36,18	4,07
		R = 100 Ω, L = 1 mH	47	325,54	5,36	226,90	18,09	43,47
			470	252.58	15,41	226,32	27,47	11,60
			680	236,31	22,11	226,88	36,18	4,16
		R = 100 Ω, L = 20 mH	47	325,48	5,36	224,95	18,09	44,69
			470	253,01	15,41	226,32	27,47	11,79
			680	236,46	22,11	226,88	36,18	4,22
2.	Ceramic 11	R = 22Ω	47	58,33	6,03	49,48	14,07	15,17
			470	53,34	12,73	49,34	17,42	7,50
			680	49,50	14,07	49,07	18,09	0,87
		R = 22 Ω, L = 0,4 mH	47	58,26	6,03	49,45	14,07	15,12
			470	53,35	12,73	49,34	17,42	7,52
			680	49,53	14,07	49,09	18,09	0,89
		R = 22Ω, L = 1 mH	47	58,15	6,03	49,40	14,07	15,05
			470	53,37	12,73	49,33	17,42	7,57
			680	49,56	14,07	49,12	18,09	0,89
		R = 22Ω, L = 20 mH	47	55,29	5,36	48,57	14,07	12,15
			470	54,47	12,73	49,33	17,42	9,44
			680	50,80	14,07	50,15	18,09	1,28

Tabel 4.13 Perbandingan arus DC *steady state* dan *overshot* pada kombinasi beban R dan L

No.	Magnet Permanen	Jenis Beban	Filter (µF)	*Overshoot*		*Steady State*		*%Mp* (%)
				Mp (Volt)	*t* (ms)	Vss (Vp)	t (ms)	
1.	NdFeB 48/11	R = 100 Ω	47	3,26	5,36	2,27	18,09	43,61
			470	2,53	15,41	2,26	27,47	11,95
			680	2,36	22,11	2,27	36,18	3,96
		R = 100 Ω, L = 0,4 mH	47	3,26	5,36	2,27	18,09	43,61
			470	2,53	15,41	2,26	27,47	11,95
			680	2,36	22,11	2,27	36,18	3,96
		R = 100 Ω, L = 1 mH	47	3,26	5,36	2,27	18,09	43,61
			470	2,53	15,41	2,26	27,47	11,95
			680	2,36	22,11	2,27	36,18	3,96
		R = 100 Ω, L = 20 mH	47	3,26	5,36	2,27	18,09	43,61
			470	2,53	15,41	2,26	27,47	11,95
			680	2,36	22,11	2,27	36,18	3,96
2.	Ceramic 11	R = 22Ω	47	0,96	5,36	0,67	18,09	43,28
			470	2,42	12,73	2,24	17,42	7,44
			680	2,25	14,07	2,23	18,09	0,89
		R = 22 Ω, L = 0,4 mH	47	2,65	6,03	2,25	14,07	15,09
			470	2,42	12,73	2,24	17,42	7,44
			680	2,25	14,07	2,23	18,09	0,89
		R = 22Ω, L = 1 mH	47	2,64	6,03	2,25	14,07	14,77
			470	2,43	12,73	2,24	17,42	7,82
			680	2,25	14,07	2,23	18,09	0,89
		R = 22Ω, L = 20 mH	47	2,44	6,03	2,35	14,07	3,69
			470	2,46	12,73	2,29	17,42	6,91
			680	2,29	14,07	2,27	18,09	0,87

Dari Tabel 4.12 dan 4.13, dapat diketahui bahwa dengan adanya penambahan filter pada masing-masing kombinasi beban R dan beban L, menghasilkan data tegangan DC, untuk *steady state* dan *overshoot* yang hampir sama. Penggunaan filter C sebesar 680 µF mengasilkan *output* yang paling baik dimana persentase *overshoot* yang dihasilkan paling kecil sebesar 4,15% untuk generator sinkron magnet permanen, dan 1,28% untuk perbandingan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11.

4.6 Simulasi Torsi *Cogging* Generator Sinkron Magnet Permanen

Cogging merupakan suatu gejala yang yang terjadi antara magnet permanen dengan *teeth* pada inti stator, yang berupa suatu hentakan (torsi yang berlawanan dengan arah putar turbin) saat memutar rotor yang mengakibatkan rotor sulit diputar dengan menggunakan tangan, hal ini dapat mengurangi efisiensi kerja generator sinkron magnet permanen. Torsi *cogging* dapat mempengaruhi kemampuan start, menimbulkan bising dan juga getaran mekanik jika generator sinkron magnet permanen dipasang pada

turbin angin. Oleh karena itu torsi *cogging* yang ada pada generator sinkron magnet permanen harus dibuat sekecil mungkin.

Pada simulasi *cogging* data yang dihasilkan berupa data torsi *cogging*. Adapun beberapa langkah untuk mereduksi torsi *cogging* yaitu : dengan cara menambah panjang celah udara, menggunakan slot dan *pole* dengan jumlah lebih banyak, menggunakan metode *skewing* (memiringkan salah satu bagian inti), dan juga membuat tonjolan pada ujung *teeth* stator. Pada penelitian desain generator sinkron magnet permanen ini, untuk memperkecil nilai torsi *cogging* menggunakan metode memperlebar panjang celah udara.

Untuk mendapatkan satu gelombang penuh *cogging*, dilakukan dengan pencuplikan data sebanyak 30 step putaran mekanikal, untuk mendapatkan nilai sudut satu gelombang penuh mekanikal dapat dicari dengan :

$$\text{Sudut satu gelombang penuh } cogging = \frac{360(\text{deg})}{KPK}$$

KPK merupakan Kelipatan Persekutuan Terkecil antara slot dan *pole* pada generator sinkron magnet permanen. Pada penelitian ini yang menggunakan 24 slot dan 8 *pole*, menghasilkan KPK sebesar 24. Sehingga besar dari sudut satu gelombang penuh simulasi *cogging* adalah :

$$\text{Sudut satu gelombang penuh } cogging = \frac{360(\text{deg})}{24} = 15(\text{deg})$$

Sudut satu gelombang penuh *cogging* merupakan besar nilai dari sudut putaran penuh mekanikal generator sinkron magnet permanen. Sedangkan untuk mendapatkan nilai sudut satu step putaran mekanikal dari generator sinkron magnet permanen didapatkan dengan cara :

$$\text{Sudut satu step putaran } cogging = \frac{sudut.satu.gelombang.penuh.cogging}{30 step}$$

$$\text{Sudut satu step putaran } cogging = \frac{15(\text{deg})}{30 step} = 0{,}5(\text{deg})$$

Dan waktu yang dibutuhkan mendapatkan sudut satu step putaran mekanikal *cogging*, dicari dengan cara :

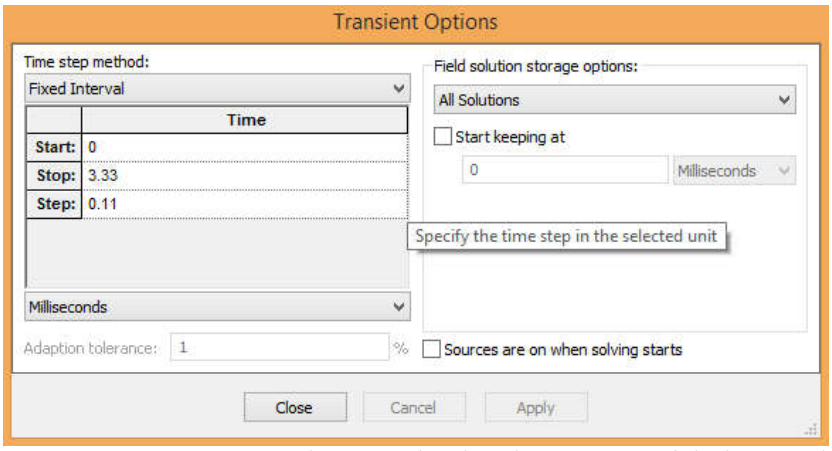
$$\text{waktu satu step putaran } cogging = \frac{sudut.perstep.putaran.cogging\ (\text{deg})}{n\left[{}^{\text{deg}}/_{\text{sec}}\right]}$$

$$\text{waktu satu step putaran } cogging = \frac{0.5(\text{deg})}{4500\left[{}^{\text{deg}}/_{\text{sec}}\right]} = 0.00011(\text{sec}) = 0.11(ms)$$

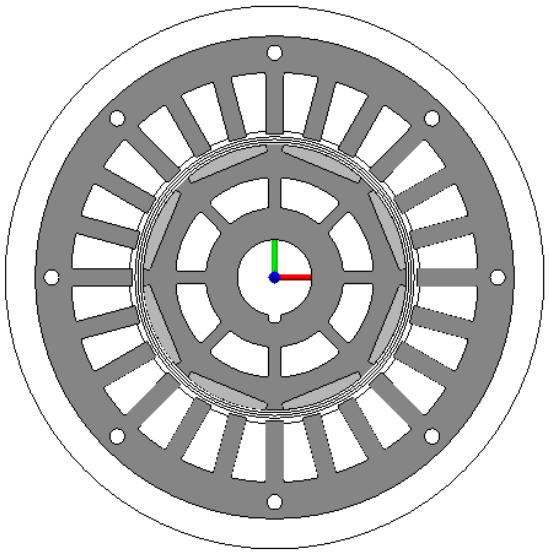
Dari perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa setiap step putaran mekanikal membutuhakan waktu sebesar $0.11(ms)$. Maka untuk mendapatkan 1 gelombang penuh dengan 30 step putaran *cogging* membutuhkan waktu sebanyak :

Waktu untuk 30 step putarani *cogging* $= 30.0{,}11(ms) = 3{,}3(ms)$

Setelah mendapatkan waktu putaran penuh sudut mekanikal dan juga waktu untuk setiap step sudut mekanikal untuk simulasi *cogging*, maka selanjutnya memasukkan nilai-nilai tersebut pada menu *Transient Option*, seperti pada Gambar 4.55.

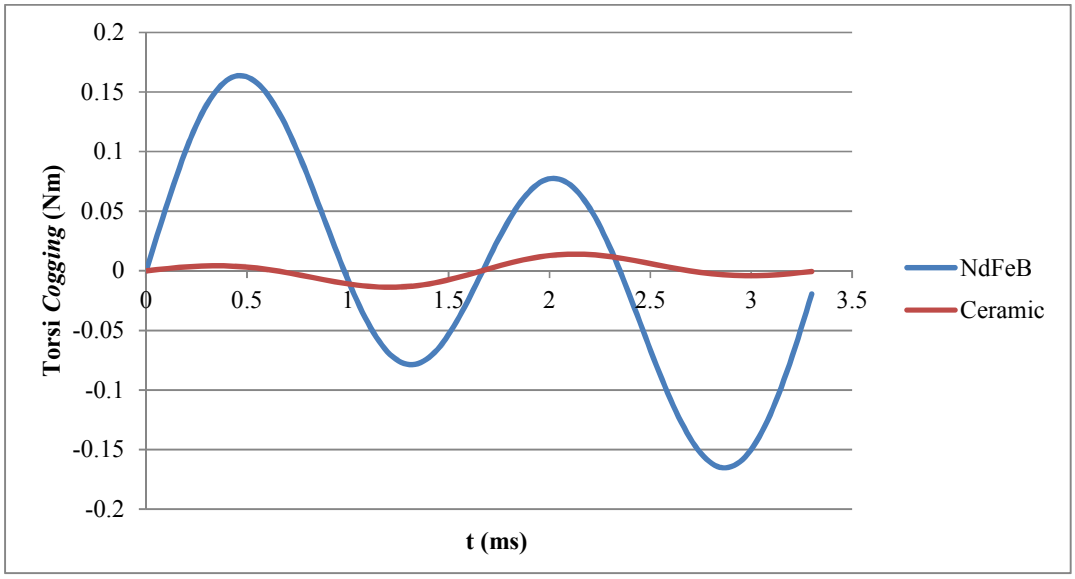


Gambar 4.55 *Transient Option* pada perangkat lunak MagNet Infolytica untuk simulasi *cogging*.



Gambar 4.56 Model generator sinkron magnet permanen untuk simulasi torsi *cogging*.

Pada simulasi torsi *cogging* yang dilakukan menggunakan perangkat lunak MagNet Infolytica, model generator sinkron magnet permanen tidak menggunakan kumparan stator, karena kumparan stator sendiri tidak mempengaruhi besar nilai dari torsi *cogging*, seperti pada Gambar 4.56.



Gambar 4.57 Torsi *cogging* pada generator sinkron magnet

Pada Gambar 4.57 dapat dilihat grafik hasil simulasi torsi *cogging*, dimana pada grafik hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa nilai maksimum torsi *cogging* yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen sebesar 0.16 Nm (sesuai pada Lampiran II-F), kemudian dengan membandingkan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11, nilai maksimum torsi *cogging* yang mampu dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen sebesar 0.013 Nm (sesuai pada Lampiran III-F). Nilai torsi *cogging* yang dipengaruhi oleh nilai fluks remanensi yang dimiliki magnet permanen tersebut. Hal ini terjadi karena kuat tarikan dari magnet permaenen jenis Neodymium Iron Boron 48/11 tentu akan lebih kuat tarikannya dibandingkan dengan menggunakan magnet permanen jenis Ceramic 11.

Nilai torsi *cogging* yang lumayan kecil ini sendiri didapatkan dengan memperbesar *air gap*, dengan memperbesar jarak *air gap* dapat mengurangi nilai torsi *cogging*, namun memiliki kekurangan yaitu dapat memperkecil nilai dari tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen, sehingga akan lebih baik tidak menggunakan teknik ini dalam mengurangi nilai dari torsi *cogging*.