

## RANCANG BANGUN DAN UJI PROTOTIP GENERATOR MAGNET PERMANEN 1kW/48 V MENGACU PADA STANDAR IEC 60034-4

Muhammad Kasim, Fitriana dan Pudji Irasari

### Abstract

*This paper discusses on the designing, construction and testing of the low-speed generator prototype for battery charging refer to the international standard documents. The specification of generator is 3 phase, 1 kW, 48 V, 18 poles, 300 rpm, using permanent magnet NdFeB with remanence flux density of 1 Tesla. The design is validated by testing the prototype to find out the power curve generated and the efficiency at loading condition. The other analysis is conducting the no-load characteristic to find out the prototype parameter conformity with the design. The test result shows that generator is able to produce voltage of 83,2 volt and output power of 596,9 watt at 300 rpm and tested efficiency 43%.*

**Keywords:** generator, permanent magnet, low speed, test standard, power curve, efficiency

### 1. PENDAHULUAN

Aplikasi generator magnet permanen (GMP) dalam sistem pembangkit listrik, dengan penggerak angin (*wind power*) maupun air (*microhydro*), dirancang khusus untuk putaran yang rendah dan tanpa gearbox, sehingga menyesuaikan putaran angin dan aliran air. GMP ini lebih efisien bila dibandingkan dengan generator biasa yang menggunakan rotor lilit<sup>[1]</sup>. Banyak literatur yang telah membahas GMP<sup>[2][3][4][5]</sup>. Ada beberapa jenis konstruksi GMP yaitu fluks aksial, fluks radial dan fluks transversal. Menurut Chen dkk.<sup>[6]</sup>, dari hasil penelitiannya menyatakan bahwa konstruksi GMP fluks radial dengan rotor di luar lebih cocok untuk aplikasi energi angin dibandingkan dengan rotor didalam. Namun berdasarkan pengalaman manufaktur selama ini ditemui bahwa membuat lilitan stator dan *balancing* dengan konstruksi rotor di luar lebih sulit dilakukan dibanding bila membuat lilitan dengan konstruksi rotor di dalam. Sehingga penelitian difokuskan pada jenis fluks radial dengan rotor di dalam, dimana rotor lebih mudah dibuat dengan kutub banyak untuk menghasilkan putaran yang rendah dalam aplikasi turbin angin<sup>[7][8]</sup>.

Hasil prototip Generator Magnet Permanent (GMP) ini membutuhkan uji laboratorium atau eksperimen sebelum diaplikasikan langsung pada sistem pembangkit energi angin. Uji ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik prototip generator secara umum dan mengetahui performansi daya terhadap kecepatan putarnya (*power curve*). Dalam penelitian ini telah dibuat implementasi uji GMP skala laboratorium untuk mempelajari karakteristik generator yang dibuat dengan mengacu pada standar dan metode uji yang baku. Sesuai dengan SNI 17025-2000,

laboratorium yang melakukan pengujian harus menggunakan metode dan prosedur yang sesuai untuk semua pengujian dalam ruang lingkupnya. Laboratorium uji juga harus memilih metode ujinya yang sudah dipublikasikan dalam standar internasional, regional, atau nasional, atau oleh organisasi teknis yang mempunyai reputasi, atau dari teks atau jurnal ilmiah yang relevan, atau seperti dari spesifikasi pabrik pembuat alat. Metode yang dikembangkan laboratorium dapat juga digunakan bila sesuai penggunaannya dan bila telah divalidasi<sup>[9]</sup>.

### 2. METODE

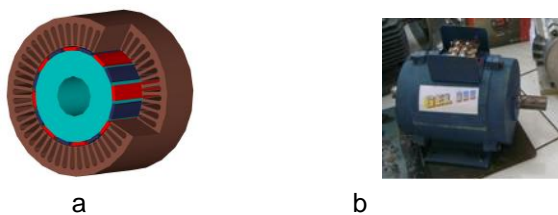
Sampai saat ini, belum ada standar uji nasional dan internasional yang spesifik yang dapat dijadikan acuan normatif untuk mempelajari GMP. Cano, *et.al*, 2004 berpendapat bahwa GMP merupakan satu jenis khusus dari generator sinkron sehingga dalam penelitiannya uji GMP dilakukan dengan pendekatan acuan pada Standar IEC 60034-4<sup>[10]</sup>. Mengenai *Rotating Electrical Machines, Part 4: Methods for Determining Synchronous Machines Quantity from Tests*<sup>[11]</sup>. Di Indonesia standar uji generator sinkron telah diimplementasikan dalam SNI 04-1077-1989 tentang Cara Uji Generator Sinkron<sup>[12]</sup>. Mengacu pada IEC 60034-4, jenis uji yang harus dilakukan antara lain:

1. Uji hubung terbuka atau uji tanpa beban (*open-circuit test*)
2. Uji resistansi stator (*resistance test*)
3. Uji hubung singkat (*short-circuit test*)
4. Uji berbeban, yang terbagi menjadi 3 sub uji (variasi beban pada putaran tetap, variasi putaran pada beban tetap, dan variasi arus pada tegangan tetap)

Adapun dalam penelitian ini ini dilakukan pengujian untuk beberapa karakteristik umum saja, yaitu karakteristik berbeban dan tanpa beban. Karakteristik tanpa beban ditujukan untuk memprediksi kesesuaian parameter rancangan dan hasil prototipnya terutama dalam konversi dayanya berupa tegangan induksi yang dibangkitkan (*electromotive force*). Metodologi uji berbeban dilakukan untuk mengetahui kurva kemampuan daya maksimum yang dapat dihasilkan (*power curve*) dan efisiensi prototip hasil uji dibandingkan dengan hasil rancangan sebagai acuan performansi prototip. Uji hubung singkat belum dilakukan karena keterbatasan kapasitas motor penggerak GMP.

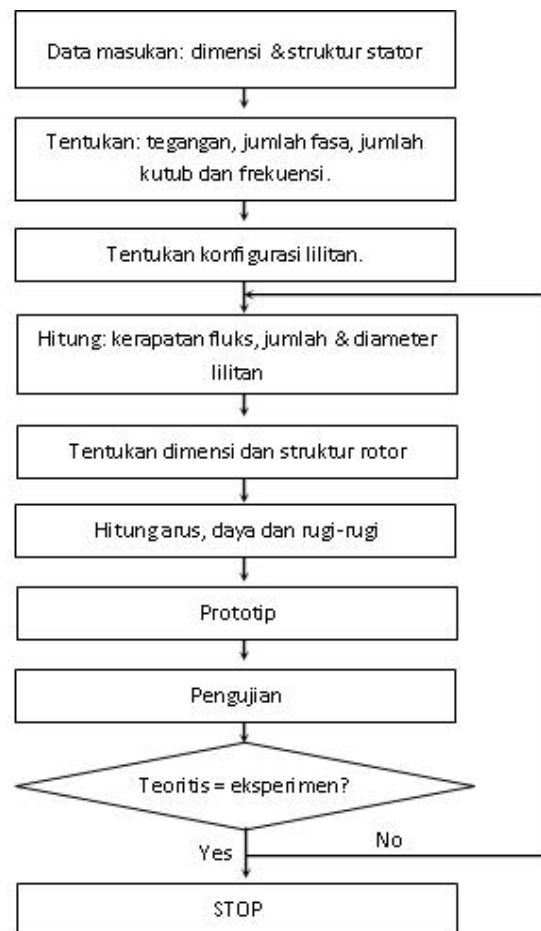
### 3. PROTOTIP GENERATOR MAGNET PERMANEN 1kW/48V

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika LIPI telah melakukan penelitian rancang bangun mesin magnet permanen sejak tahun 2005, menggunakan magnet jenis Barrium Ferrit. Namun karena kekuatan magnetnya sangat rendah hanya 600 Gauss, maka prototip pertama masih jauh dari target, yakni efisiensinya hanya 10% dari 3 kW, 1 fasa, 220 V, 500 rpm yang direncanakan. Selanjutnya penelitian dioptimasi dengan membuat generator magnet permanen (GMP) dengan rotor menggunakan magnet yang lebih kuat yaitu jenis NdFeB 4000 Gauss dengan dimensi 70 x 30 x 8 mm<sup>3</sup>. GMP yang akan dibahas dalam paper ini didesain untuk bekerja pada rating 1 kW, 3 fasa, 300 rpm, 48 volt sebagai pengisi baterai pada pembangkit energi angin, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1 (a) Generator Fluks Radial Rotor dalam, (b) Prototip GMP 1 kW/48V yang dibuat

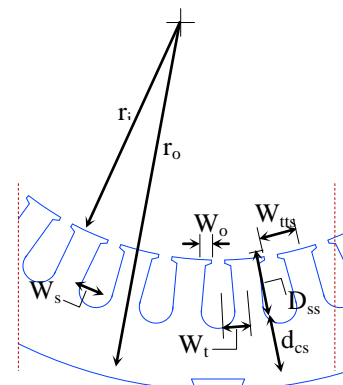
Metode perancangan GMP dilakukan dengan berbasis pada dimensi stator yang sudah ada di pasaran<sup>[8]</sup>. Metodologi perancangan (desain) mengikuti *flow chart* yang diperlihatkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2 Flowchart Metodologi Perancangan

Struktur dan dimensi stator GMP yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 3 dan dinyatakan secara rinci dalam Tabel 2.

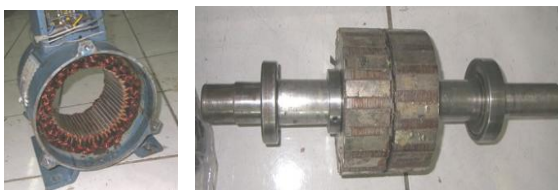
Data stator yang ada diformulasikan dan menghasilkan keluaran sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 3.



Gambar 3 Struktur stator yang digunakan dengan casing besi tanpa sirip

Tabel 2 Dimensi Stator				Tabel 3 Hasil Perhitungan Desain Prototip			
Simbol	Besaran	Satuan	Ket.	Simbol	Besaran	Satuan	Ket.
$S_s$	54	alur	jumlah alur	$K_w$	1		Faktor lilit
$r_i$	0,0738	m	radius dalam	$K_D$	1		Faktor distribusi
$D_i$	0,1476	m	diameter dalam	$N_{PH}$	266		Jumlah lilitan/fasa
$r_o$	0,170	m	radius luar	$\phi$	0.0008120	weber	Fluks magnet
$D_o$	0,340	m	diameter luar	$\tau$	0.0258	meter	Kisar alur
$L_i$	0,103	m	panjang efektif stator	$A_s$	0.9458141	mm <sup>2</sup>	Luas penampang kawat
$d_{cs}$	0,0412	m	lebar yoke	$D_s$	1.0973823	mm	Diameter kawat
$W_o$	0,00288	m	lebar bukaan alur	$I$	4.7290704	amper	Arus fasa
$W_{ts}$	= 0,00571	m	lebar gigi atas stator	$P$	681	watt	Daya nominal
$W_{ts}$	0,0045	m	lebar gigi stator	$V$	48	volt	Tegangan nominal
$W_s$	0,0112	m	lebar alur stator	$R_s$	2.08	ohm	Resistansi/fasa
$D_{ss}$	0,0226	m	kedalaman alur stator	$P_{Gr}$	278.59	watt	Rugi total generator
$A_{ss}$	111,93	m <sup>2</sup>	luas alur stator	$P_o$	402.40	watt	Daya keluaran generator
				$\eta$	59	%	Efisiensi generator

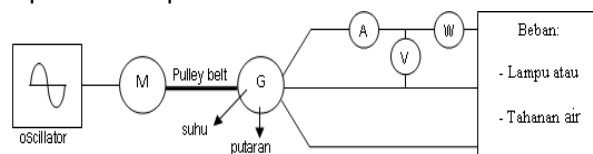
Konstruksi rotor dirancang beralur untuk menempatkan magnet sesuai desain sebagaimana dilihat pada gambar . Magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB jenis N35 dengan kerapatan flux remanensi sebesar ( $B_r$ ) 1 T dan ditentukan kerapatan fluks rata-rata di celah udara ( $B_g$ ) sebesar 0,5 T. Digunakan dua buah magnet dalam satu kutub ukuran masing-masing ukuran 50,8 x 16 x 12 mm. Diameter rotor 0,147 meter dan panjang laminasinya 0,073 meter.



Gambar 4 Prototip Stator dan Rotor yang Dibuat dan Diasembling Menjadi GMP 1kW/48V

#### 4. HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

Uji GMP dilakukan dengan cara memutar generator G, menggunakan motor induksi M melalui *pulley belt* dengan rasio 2 : 5. Putaran motor diatur menggunakan oscillator. Beban yang digunakan untuk pengujian ada dua jenis, yaitu untuk beban konstan dengan menggunakan lampu pijar sedangkan untuk mendapatkan beban variabel menggunakan tahanan air. Metode uji GMP diperlihatkan pada Gambar 5 dan *set-up* uji di laboratorium diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 5 Metode Uji Generator Magnet Permanen

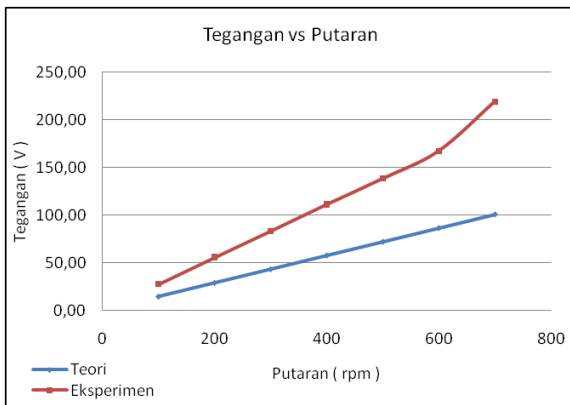


Gambar 6 Set-up Uji Prototip GMP dengan Beban Lampu dan Tahanan Air serta Instrumen Ukurnya



#### 4.1 Uji Tanpa Beban

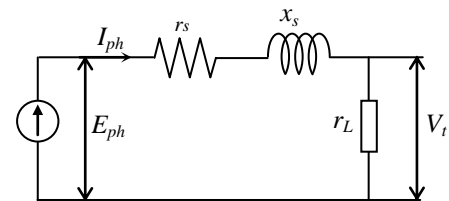
Pada uji tanpa beban, putaran generator dinaikkan secara bertahap dan tegangan keluaran diukur pada tiap putaran yang dikehendaki. Uji ini bertujuan untuk mengetahui variasi tegangan terhadap putaran dan umum dilakukan untuk berbagai jenis generator. Uji tanpa beban merupakan metode uji utama yang harus dilakukan setelah prototip selesai dibuat dimana terminal generator dihubungkan terbuka (tidak diberi beban). Karakteristik kurva tegangan terhadap kecepatan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Hasil Uji Prototip GMP pada Kondisi Tanpa Beban

Gambar 7 di atas menunjukkan hasil uji prototip GMP pada kondisi tanpa beban dibandingkan terhadap hasil perhitungan desain (teori). Pada uji eksperimen GMP menghasilkan putaran 300 rpm dan besarnya tegangan yang dihasilkan adalah 83,2 Volt. Secara teori tegangan keluaran pada kondisi tanpa beban adalah tegangan induksi akibat efek medan magnet yang berubah-ubah (*electromotive force* atau EMF) dan jika dinyatakan dengan rangkaian pengganti generator magnet permanen dan hubungannya dengan tegangan

keluaran terminal seperti diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Rangkaian Pengganti Generator Magnet Permanen

Besarnya tegangan terminal  $V_t$  pada kondisi tanpa beban sama dengan tegangan EMF dan dinyatakan dengan<sup>[3]</sup>:

$$V_T = E_{PH} - I_{PH}(R_s + jx_s) \quad (1)$$

Tegangan induksi EMF yang dibangkitkan besarnya adalah<sup>[13]</sup>

$$E_{PH} = 4,44fN\phi k_d k_p \quad (2)$$

Dimana:

$E_{PH}$  : tegangan keluaran pada kondisi tanpa beban

$f$  : frekuensi diambil 50 Hz (Hertz)

$\phi$  : besar fluks magnet permanen yang digunakan

$N$  : jumlah lilitan per fasa

$k_p$  : faktor kisar kutub generator.

Nilai  $\phi$  ditentukan oleh kerapatan fluks magnetik di celah udara ( $B_g$ ) dan luas penampang magnet yang digunakan ( $A_m$ ), dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$\phi = B_g \times A_m \quad (3)$$

Jadi nilai EMF ini selain dipengaruhi oleh konfigurasi lilitan (faktor belitan) juga dipengaruhi oleh konfigurasi magnet yang dirancang, yaitu besaran fluks magnetik dan susunan magnet<sup>[3]</sup>.

Dari Persamaan (1)-(3) dapat dilihat bahwa nilai tegangan GMP ini selain dipengaruhi

oleh konfigurasi lilitan (faktor belitan) juga dipengaruhi oleh konfigurasi magnet yang dirancang, yaitu besaran fluks magnetik dan susunan magnet. Sehingga perbedaan besar tegangan keluaran tanpa beban antara teori dan hasil pengujian (Gambar 7) disebabkan oleh perbedaan pada nilai  $B_g$  saat perancangan. Pada perancangan nilai  $B_g$  yang digunakan adalah 0,5 T atau 0,5 dari kerapatan flux remanensi yang ditentukan oleh pabrik pembuat magnet (Br), sedangkan nilai  $B_g$  setelah dilakukan pengujian besarnya menjadi 0,84 T. Adanya perbedaan nilai  $B_g$  ini mengakibatkan tegangan eksperimen menjadi lebih besar.

Dari persamaan (2), dapat diketahui bahwa jumlah lilitan stator akan mempengaruhi besarnya tegangan yang diinduksikan. Dengan menggunakan  $B_g$  hasil perancangan maka jumlah lilitan yang terpasang pada prototip stator sebanyak 266 lilitan per fasa (Tabel 3). Sedangkan bila menggunakan nilai  $B_g$  sebesar 0,84 T (dari hasil eksperimen) maka jumlah lilitan yang diperoleh adalah 190 lilitan. Jumlah lilitan yang mengecil ini seharusnya menghasilkan tegangan induksi yang lebih kecil pula. Namun eksperimen menunjukkan fluks magnet yang membesar sedangkan lilitan sudah terpasang dalam prototip sebanyak 266 lilitan (dari desain awal), akibatnya tegangan keluaran hasil eksperimen menjadi lebih besar. Hasil ini terjadi pula saat putaran generator diperbesar 2 kali putaran nominal, didapatkan hasil tegangan sebesar 219 Volt pada putaran 700 rpm, sedangkan pada perancangan tegangan yang dihasilkan pada putaran yang sama adalah 100,8 volt.

#### 4.2 Uji Tahanan Stator

Selanjutnya GMP dilakukan uji resistansi untuk menentukan tahanan stator sehingga dapat memprediksi rugi-rugi (losses) dan panas yang ditimbulkan oleh lilitan kawat pada stator. Perbedaan nilai tahanan pada lilitan per fasanya harus diukur setelah proses melilit (*winding*) dilakukan. Dalam formulasi desain (Tabel 3), telah ditentukan kawat lilitan stator menghasilkan resistansi sebesar 2,08 Ohm per fasa. Uji tahanan stator diperlukan untuk mengetahui efisiensi dan kemampuan generator dibandingkan dengan hasil pengujian.

Sebelum uji, terlebih dahulu diukur resistansi dari lilitan stator. Kemudian generator dijalankan pada putaran tertentu. Setelah beberapa waktu, generator dihentikan dan kembali diukur resistansi stator pada akhir pengujian. Resistansi awal terukur sebesar 4,6 ohm dengan suhu lilitan 31°C dan setelah uji dilakukan resistansi yang terukur adalah sebesar

5 Ohm dengan suhu 47°C. Kenaikan suhu lilitan sangat mempengaruhi resistansi sebagaimana dinyatakan dalam persamaan <sup>[14]</sup>

$$R_{T2} = R_{T1} (1 + \alpha (T_2 - T_1)) \quad (4)$$

di mana:

$R_{T1}$  = resistansi stator pada suhu T1

$R_{T2}$  = resistansi stator pada suhu T2

$\alpha$  = koefisien suhu konduktor (untuk tembaga = 0,00393  $\Omega/^\circ\text{C}$  pada suhu 20°C).

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bahwa apabila  $T_2 > T_1$  maka resistansi stator akan naik. Kenaikan resistansi akibat naiknya suhu juga berpengaruh terhadap tegangan generator.

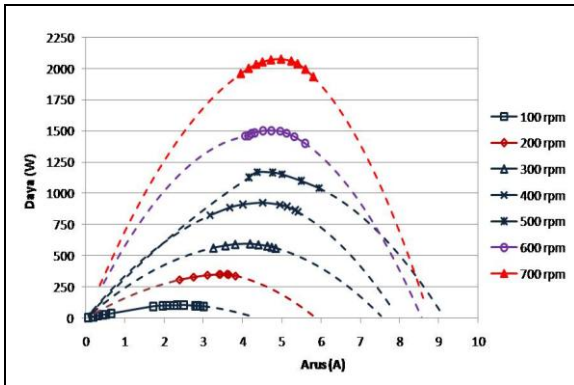
Hubungan antara tegangan jatuh dengan kenaikan resistansi lilitan juga dapat dijelaskan dengan rangkaian pengganti generator magnet permanen berbeban seperti diperlihatkan pada Gambar 8. Dari Persamaan (4) dapat dilihat bahwa makin besar  $R_s$  akibat kenaikan suhu maka makin kecil tegangan pada terminal generator.

#### 4.3 Uji Berbeban

Uji berbeban adalah uji yang harus dilakukan yang menyatakan generator dalam kondisi normal. Uji beban pada kondisi putaran tetap dilakukan untuk mendapatkan kurva daya (*power curve*) pada tiap putaran yang berbeda, dengan kisar putaran 100 sampai dengan 1000 RPM. Untuk menghasilkan putaran yang tetap, generator dihubungkan dengan beban tahanan air, dan putaran diatur pada kecepatan tertentu. Beban berupa batang tembaga dicelupkan dalam air sampai alat ukur menunjukkan arus yang dikehendaki. Secara bertahap arus beban dinaikkan dengan cara mengatur tingkat kedalaman celupan tembaga. Tiap kenaikan arus beban akan diukur besarnya tegangan GMP dan daya yang dihasilkan.

Karakteristik kurva arus beban terhadap daya yang dihasilkan pada kecepatan tetap (dengan kisaran kecepatan 100, 200, sampai 700 rpm) seperti ditunjukkan pada gambar 9.

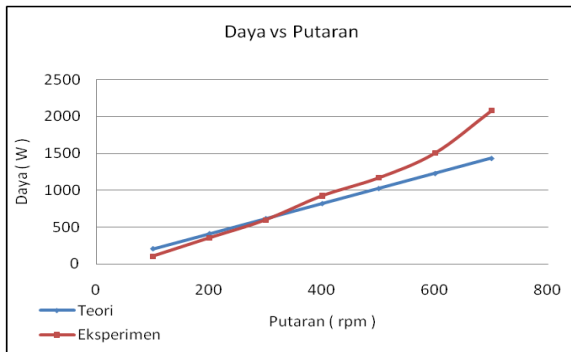




Gambar 9 Hasil Uji Prototip GMP pada Kondisi Berbeban (Putaran 100-700 rpm)

Gambar di atas menunjukkan karakteristik berbeban daya terhadap arus dengan putaran tetap. Pada putaran 100 rpm daya maksimum yang dihasilkan sebesar 104,8 dengan arus sebesar 2,50 ampere. Untuk putaran tinggi sebesar 700 rpm daya maksimum yang dihasilkan sebesar 2074 watt dengan arus sebesar 4,98 ampere. Sedangkan berdasarkan perhitungan desain, untuk putaran 700 rpm daya yang dihasilkan sebesar 1434 watt dengan arus sebesar 9,94 ampere.

Kurva karakteristik daya dibuat untuk kecepatan yang berbeda-beda sehingga dapat diketahui daya maksimum pada tiap kecepatan (*power curve*) seperti ditunjukkan pada Gambar 10.

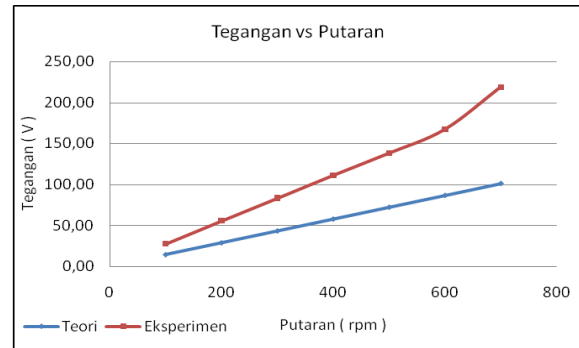


Gambar 10 Perbandingan Kurva Daya Prototip GMP Hasil Desain dan Eksperimen

Gambar di atas menunjukkan perbandingan daya dan putaran antara hasil desain dan pengujian. Pada pengujian daya minimum dihasilkan sebesar 104, 8 watt untuk putaran 100 rpm dan daya maksimum pada putaran 700 rpm sebesar 2074,3 watt. Sedangkan desain (perhitungan) menghasilkan daya minimum pada putaran 100 rpm sebesar 204 watt dan daya maksimum pada putaran 700 rpm sebesar 1434 watt.

Pada putaran nominal 300 rpm, daya yang dihasilkan pada perancangan sebesar 614 Watt sedangkan dari hasil eksperimen daya maksimum yang dicapai GMP adalah 596 Watt. Dilihat dari kemampuan daya yang dihasilkan, prototip belum mencapai daya yang diinginkan sebesar 1 kW, sehingga efisiensi GMP belum optimal sesuai yang diharapkan. Hal ini dibuktikan pada hasil uji resistansi stator yang menghasilkan nilai resistansi lebih tinggi dari hasil desain, akibatnya rugi-rugi generator menjadi lebih besar dan efisiensi pasti akan jauh lebih kecil dari hasil desain (persamaan 1).

Pada kondisi beban tetap, perbandingan tegangan dan putaran terlihat seperti pada Gambar 11



Gambar 11 Perbandingan Tegangan – Arus Prototip GMP Hasil Desain dan Eksperimen

Gambar di atas menunjukkan perbandingan dan putaran antara desain dan hasil eksperimen. Pada putaran 100 rpm tegangan yang dihasilkan berdasarkan perhitungan design adalah 14.4 Volt sedangkan eksperimen menunjukkan nilai sebesar 27.4 Volt. Pada putaran yang lebih tinggi, pada 700 rpm tegangan yang dihasilkan oleh generator berdasarkan hasil perhitungan adalah sebesar 100.80 volt sedangkan hasil eksperimen menunjukkan nilai tegangan sebesar 219 volt.

## 5. KESIMPULAN

- Prototip GMP ini telah diuji mengacu pada metode yang digunakan dalam standar internasional yaitu IEC 60034-4 mengenai "Rotating Electrical Machines, Part 4: Methods for Determining Synchronous Machines Quantity from Tests", dan memenuhi SNI 04-1077-1989 mengenai Cara Uji Generator Sinkron.
- Dari hasil pengujian laboratorium terhadap karakteristik umum dari generator yang dibuat untuk aplikasi pembangkit dengan putaran rendah ini, dapat dinyatakan bahwa

prototip dalam paper ini belum memenuhi spesifikasi sesuai rancangan yang diharapkan yaitu 300 rpm, 48 Volt dan daya keluaran sebesar 1 kW dengan efisiensi rancangan sebesar 59%. Prototip GMP menghasilkan resistansi stator yang lebih besar dari hasil desain, sehingga rugi-rugi prototip GMP menjadi lebih besar (tabel 3) dan efisiensi prototip juga lebih kecil dari perkiraan desain yaitu sebesar 43%. Konfigurasi lilitan dan penentuan parameter rapat fluks di celah udara ( $B_g$ ) telah mengakibatkan tegangan keluaran yang dihasilkan (83,2V) lebih tinggi dari nilai tegangan yang dirancang (48V).

- c. Perbedaan nilai teoritis dan eksperimen, khususnya untuk penentuan  $B_g$  dapat diperkecil dengan menentukan nilai yang sesuai dengan spesifikasi dari magnet permanen yang digunakan, yaitu parameter *Coefficient Carter* dan *Permeance Coefficient* (PC).

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Chen, Y, P. Pillay, A. Khan. 2004. *PM Wind Generator Comparison of Different Topologies*, Industry Applications Conf. 39th IAS Annual Meeting **Seattle**, Washington: hal 1405-1412
2. Comanescu, M., A. Keyhani, M. Dai. 2003. *Design and Analysis of 42-V Permanent-Magnet Generator for Automotive Applications*. IEEE Transaction on Energy Conversion. 18 (1)
3. Cano L., Arribas L., Cruz. I. 2004. "1.5 KW Permanent Magnets Synchronous Generator Experimental Bench Test", Proceeding of 2004 European Wind Energy EWEA Conference and Exhibiton in London UK, 22-25 November 2004
4. IEC 60034-4 mengenai "Rotating Electrical Machines, Part 4: Methods for Determining Synchronous Machines Quantity from Tests", International Electrotechnical Commission, 1997
5. Irasari. Pudji. 2008. *Metode Perancangan Generator Magnet Permanen Berbasis Pada Dimensi Stator Yang Sudah Ada*. Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Vol 7, No.1, Juni 2008. Jakarta
6. Khan, M. A., P. Pillay. 2005. Design of a PM Wind Generator, Optimised for Energy Capture over a Wide Operating Range. *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*

7. Khan, M. A., P. Pillay, M. Malengret. 2003. *Impact of Direct-Drive WEC System on the Design of a Small PM Wind Generator*. *IEEE Power Tech. Conference*. Bologna
8. Richard H.E, William H.M. 1995, *Handbook of Electric Motors*, Marcel Dekker, Inc., New York, p.241-243
9. SNI 19-17025-2000. 2000. "Persyaratan umum kompetensi laboratorium pengujian dan laboratorium kalibrasi, Badan Standardisasi Nasional
10. SNI 04-1077-1989 mengenai "Cara Uji Generator Sinkron", Standar Nasional Indonesia, Badan Standardisasi Nasional, 1989
11. Veley, V.F. 1993, *DC/AC Electricity*, McGraw-Hill, Singapore: hal. 22-23
12. Wang, J., W. Wang, G. W. Jewell, D. Howe. 2005. *Design of a Miniature Permanent-Magnet Generator and Energy Storage System*.
13. Widyan, M. S. 2006. *Design, Optimization, Construction and Test of Rare-Earth Permanent-Magnet Electrical Machines with New Topology for Wind Energy Applications*. Ph.D Thesis. Berlin University
14. Wu, W., V. S. Ramsden, T. Crawford, G. Hill. 2000. *A Low-Speed, High-Torque, Direct-Drive Permanent Magnet Generator for Wind Turbines*. IEEE Industrial Application Conference

#### BIODATA

##### Muhammad Kasim

Penulis bekerja di Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik LIPI. Alamat penulis. Alamat penulis Komplek LIPI Gd. 20 P2 TELIMEK LIPI Jalan Cisitu No.21/154D Dago Bandung 40135. [kasime99uh@yahoo.co.id](mailto:kasime99uh@yahoo.co.id)

##### Fitriana

Penulis bekerja di Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik LIPI. Alamat penulis. Alamat penulis Komplek LIPI Gd. 20 P2 TELIMEK LIPI Jalan Cisitu No.21/154D Dago Bandung 40135

[fitri\\_salsa@yahoo.com.au](mailto:fitri_salsa@yahoo.com.au)

##### Pudji Irasari

Penulis bekerja di Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik LIPI. Alamat penulis. Alamat penulis Komplek LIPI Gd. 20 P2 TELIMEK LIPI Jalan Cisitu No.21/154D Dago Bandung 40135

[pirasari@yahoo.com](mailto:pirasari@yahoo.com)