

OPTIMASI DESAIN PERMANENT MAGNETIC BEARING UNTUK APLIKASI TURBIN ANGIN DAYA 10 KW

Kriswanto¹⁾, Ahmad Roziqin²⁾, Rizqi Fitri Naryanto³⁾

^{1), 2), 3)} Gdg. E5 Lt.2 Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Gunungpati, Semarang

¹⁾Email: kriswanto.tm@gmail.com

Abstrak

Kegagalan *bearing* dapat mengakibatkan *downtime* yang besar dalam pengoperasian turbin angin, dan menyebabkan kegagalan generator turbin angin. *Magnetic bearing* adalah jenis bantalan tanpa kontak yang tidak memerlukan pelumasan. Tujuan penelitian ini adalah: (1) membuat spesifikasi desain *axial* PMB sebagai *bearing* aksial turbin angin sumbu horizontal; (2) mensimulasikan gaya aksial dari desain *Axial* PMB yang optimal untuk mendukung beban bearing aksial turbin angin 10 kW. Penelitian ini menggunakan simulasi metode elemen hingga untuk menentukan gaya aksial akibat *axial displacement* dari *inner magnet* terhadap *outer magnet*. Hasil penelitian mendapatkan spesifikasi desain *axial* PMB yang dapat menumpu gaya aksial poros utama turbin angin 10 kW adalah desain *axial* PMB *b20-c4* yang terdiri dari tiga *inner magnet* dan tiga *outer magnet* dengan besar polarisasi setiap magnet sebesar 1, 4 tesla. Simulasi gaya aksial dari desain *axial* PMB dengan variasi tebal magnet dan celah magnet menunjukkan bahwa desain *axial* PMB dengan *b* 20 mm dan *c* 4 mm menghasilkan gaya aksial yang optimal yaitu pada F_z 2784 N pada *displacement* (*dZ*) 2,17mm.

Kata kunci: *Axial* PMB, *displacement*, gaya aksial, simulasi, TASH

Abstract

*Bearing failure can lead a large downtime in the operation of wind turbines, and led to the failure of wind turbine generators. Magnetic bearing is a kind of non-contact bearings that require no lubrication. This study aims: (1) make design specifications of axial PMB as the axial bearing of the horizontal axis wind turbines; (2) simulate the axial force of Axial PMB an optimum design to support the axial load wind turbine bearing 10 kW. This study using the finite element method simulations to determine the axial force due to axial displacement of the inner magnet to the outer magnet. The results of research get design specifications of axial PMB that can support axial forces main shaft 10 kW wind turbine is an axial design PMB b20-c4 consisting of three inner magnet and three outer magnet with magnetic polarization of each 1, 4 tesla. Simulation axial force of the axial PMB design with thickness variation of magnets and magnet gap indicates that axial PMB design with a b 20 mm and c 4 mm produce optimal axial force that is at F_z 2784 N in displacement (*dZ*) 2,17mm.*

Keywords: *Axial* PMB, *displacement*, *axial force*, *simulation*, TASH

1. PENDAHULUAN

Pembangunan Kebijakan Energi Nasional (KEN) Indonesia sampai tahun 2050 akan mengurangi konsumsi energi minyak dan beralih ke gas dan energi baru terbarukan (Ronitua, 2012). Salah satu jenis energi baru terbarukan adalah energi angin. Turbin angin adalah alat untuk mengkonversi energi kinetik dalam angin menjadi listrik (Manwell et al., 2009). Indonesia adalah negara kepulauan yang mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu $\pm 80.791,42$ km merupakan wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin, namun sayang potensi angin belum dimanfaatkan secara maksimal. Kapasitas terpasang pembangkit tenaga angin baru sekitar 1,1 MWe dari potensi 9.290 MWe (Sugiyono, 2014).

Jenis turbin angin berdasarkan pembangkit (*generator*) dibedakan menjadi dua jenis, yakni dengan *gearbox* (*geared generator*) dan tanpa *gearbox* (*direct drive generator*). Pada jenis *direct drive generator* bagian *rotor blade* langsung dihubungkan dengan generator sehingga tidak menggunakan *bearing* poros utama. *Bearing* poros

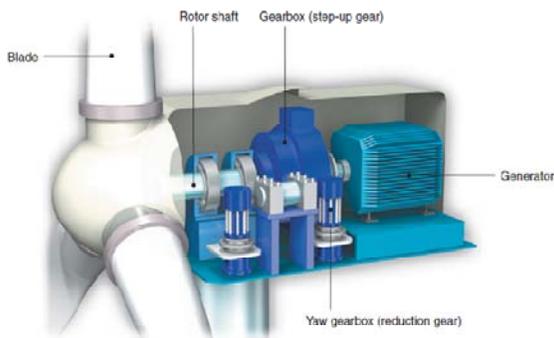
utama berfungsi untuk meneruskan aksi beban arah aksial terhadap sumbu poros.

Tanpa adanya *bearing* poros utama pada jenis turbin angin *direct drive generator* menyebabkan *bearing* pada poros generator menerima beban aksial yang besar secara langsung dari arah angin. Jika sistem pelumasan *bearing* tidak berfungsi dengan baik, maka kontak antara kedua logam yang bergesekan mengakibatkan terjadinya keausan dan berakibat pada kerusakan dan kegagalan *bearing*. Kerusakan dan kegagalan *bearing* menyebabkan kerusakan dan kegagalan pada generator.

Bearing adalah komponen penting dari TASH. Kegagalan *bearing* merupakan faktor penyebab yang signifikan dari seluruh kegagalan generator turbin angin (Gong & Xiao, 2011). Salah satu upaya meningkatkan efisiensi dan kehandalan turbin angin adalah dengan meminimalisasi gesekan yakni menggunakan bantalan magnet (Kriswanto & Yudiono, 2014). *Magnetic bearing* adalah sebuah *bearing* yang menumpu beban dengan menggunakan levitasi magnet.

Kriswanto telah melakukan uji kecepatan putar dari *radial Permanent Magnetic Bearing* (PMB radial) untuk aplikasi turbin angin sumbu horizontal (TASH) dimana hasil uji kecepatan putar menunjukkan bahwa *Radial PMB* dapat meningkatkan kecepatan putar rata-rata sebesar 87,4 % dibandingkan *bearing* konvensional (Kriswanto, 2013). Pada penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan PMB dapat meningkatkan efisiensi turbin angin karena PMB merupakan *bearing* tanpa gesekan. Kriswanto memodelkan PMB aksial untuk aplikasi turbin angin horizontal 400 watt, dengan hasil simulasi bahwa desain PMB aksial yang terdiri dari tiga susunan magnet permanen (tiga *inner magnet* pada rotor dan tiga *outer magnet* pada stator) dengan besar polarisasi setiap magnet sebesar 1 tesla mampu untuk menahan beban aksial turbin angin (Kriswanto & Yudiono, 2014).

Turbin angin yang ada selama ini masih menggunakan *bearing* konvensional sehingga membutuhkan perawatan dan jika terjadi masalah kerusakan akan membutuhkan biaya yang sangat besar dan penghentian operasi untuk proses perbaikan. Berdasarkan uraian diatas, maka peneliti akan melakukan optimasi desain pada PMB aksial agar dapat menahan gaya aksial pada turbin angin daya 10kW. Tujuan penelitian ini adalah; membuat spesifikasi desain *axial* PMB sebagai *bearing* aksial turbin angin sumbu horizontal (TASH) dan mensimulasikan gaya aksial dari desain *Axial* PMB yang optimal untuk mendukung beban bearing aksial TASH 10 kW. PMB aksial yang akan dibuat sebagai *bearing* poros utama turbin angin ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Bearing* poros utama TASH (Uboguhigh, 2010)

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian dengan menggunakan simulasi metode elemen hingga. Simulasi digunakan untuk menghitung total gaya magnet pada rotor *axial* PMB dengan mengintegrasikan persamaan vektor (<http://www.comsol.com>):

$$f = n \cdot T = -\frac{1}{2}n(H \cdot B) + (n \cdot H)B^T \quad (1)$$

dimana f adalah gaya magnet (N), n adalah vektor normal luar, T adalah tensor stres Maxwell, H adalah medan magnet (Koe), B adalah Kerapatan garis gaya magnet/polarisasi. Definisi model magnet pada metode elemen hingga menggunakan hubungan antara kerapatan garis gaya magnet dan medan magnet, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (2)$$

dimana μ_r adalah permeabilitas relatif medan magnet dan μ_0 permeabilitas magnetik mutlak. Medan magnet menggunakan model hukum Ampere, dengan persamaan:

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (3)$$

$$\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \cdot A' = J \quad (4)$$

dimana ∇ adalah operator vektor, A' adalah vektor potensial magnetik.

Kondisi batas menggunakan persamaan:

$$n_1 A' = 0 \quad (5)$$

Gaya *axial* dari konfigurasi *axial* PMB dihitung melalui simulasi menggunakan *software* COMSOL. Simulasi dilakukan dengan mengatur jarak *axial displacement* dari 0 mm sampai dengan 4 mm. Kriteria batas maksimum jarak *displacement* yang diterima dalam penelitian ini adalah 2,5mm ($dZ \leq 2,5$ mm). Variasi ketebalan magnet yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: 10 mm, 20 mm dan 30 mm, sedangkan lebar celah magnet antara lain: 4 mm, 5 mm dan 6 mm.

2.1. Spesifikasi Turbin Angin

Desain *axial* PMB yang dibuat merupakan desain bantalan aksial poros utama TASH. Tipe TASH yang digunakan adalah SA-10KW buatan Fujian, China.

Tabel 1 Data spesifikasi TASH

| Komponen | Spesifikasi | Jumlah | Satuan |
|-------------|----------------------------|--------|--------|
| Rotor Blade | Jumlah | 3 | pcs |
| | Diameter | 8 | m |
| | Koefisien Daya TSR | 0,59 | - |
| Poros | Diameter | 3,0 | - |
| Generator | Diameter | 0,32 | m |
| | Daya | 10000 | watt |
| Kontrol | <i>Start-up Wind Speed</i> | 2,5 | m/s |
| | <i>Cut in speed</i> | 3,0 | m/s |
| | <i>Cut out speed</i> | 15 | m/s |

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Gaya Aksial Poros Utama TASH

Gaya aksial (F_{yR}) poros utama TASH dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$F_{yR} = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \quad (6)$$

Hasil perhitungan gaya aksial poros utama TASH ditunjukkan pada Gambar 1.

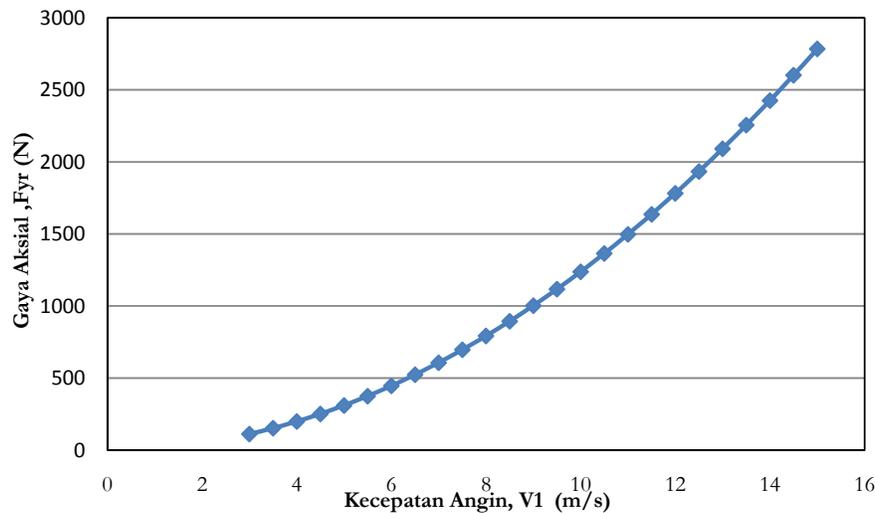
Gaya F_{yR} dihitung dari kecepatan v_1 3 m/s s.d. 15 m/s. Berdasarkan Gambar 2 gaya aksial minimum sebesar 111,4 dihasilkan pada kecepatan angin 3,0 m/s yaitu pada kecepatan *cut-in* TASH, sedangkan gaya aksial maksimum sebesar 2784 N dihasilkan pada kecepatan angin 15 m/s, yaitu pada kecepatan *cut-out* TASH. Gaya aksial 2784 N merupakan gaya yang harus

didukung poros utama TASH, dengan batas *displacement* sebesar 2,5mm.

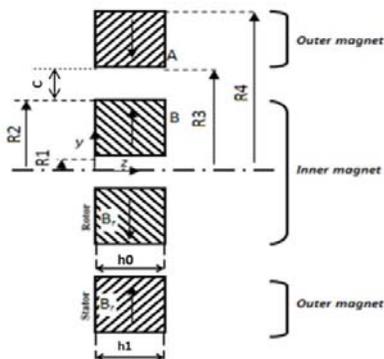
3.2. Perencanaan Desain Axial PMB

Perencanaan *axial* PMB untuk poros utama TASH memperhitungkan besar gaya aksial maksimum yang ditumpu. Desain *axial* PMB menggunakan konfigurasi dari susunan dua atau lebih magnet permanen *ring* konsentris yang memiliki dimensi yang berbeda dan memiliki arah kerapatan gaya magnet (B_r) yang berbeda atau berlawanan. Desain konfigurasi dasar *axial* PMB ditunjukkan pada Gambar 3.

Magnet permanen *ring* A yaitu magnet *ring* luar (*outer magnet*) yang tetap pada *house* PMB (*stator*), dan magnet permanen *ring* B yaitu magnet *ring* dalam (*inner magnet*) yang tetap pada poros utama TASH (*rotor*).



Gambar 2. Grafik gaya aksial poros utama TASH



Gambar 3. Konfigurasi dasar *axial* PMB

Dimana R_1 adalah dimensi radius dalam pada *inner magnet*, R_2 adalah dimensi radius luar pada *inner magnet*. R_3 adalah dimensi radius dalam pada *outer magnet*, dan R_4 adalah dimensi radius luar pada *outer magnet*. R_1 , R_2 , R_3 , dan R_4 dalam satuan mm. h_0

adalah lebar *inner magnet* dan h_1 adalah lebar *outer magnet*. h_0 dan h_1 dalam satuan mm. c adalah lebar celah antara *inner magnet* dan *outer magnet*. Sumbu z adalah sumbu arah aksial dan sumbu y adalah sumbu arah radial. B_r adalah kerapatan fluks magnet/polarisasi dalam satuan T (tesla). Spesifikasi magnet permanen yang digunakan dalam penelitian sesuai dengan Tabel 2.

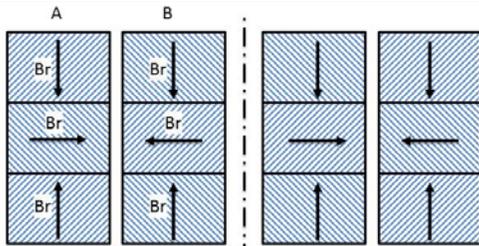
Konfigurasi dasar *axial* PMB terdiri dari minimal dua magnet ring konsentris (Gambar 3), sedangkan berdasarkan hasil penelitian Kriswanto menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah konfigurasi magnet penyusun PMB maka nilai gaya aksial yang dihasilkan semakin besar (Kriswanto & Yudiono, 2014). Pada penelitian ini konfigurasi *axial* PMB yang digunakan terdiri dari tiga susunan magnet yaitu terdiri dari tiga magnet dalam dan tiga magnet luar. Polarisasi *inner magnet* dan *outer magnet*

bagian tengah pada arah radial, sedangkan polarisasi *inner magnet* dan *outer magnet* bagian samping kanan dan kiri pada arah aksial. Desain konfigurasi axial

PMB pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.

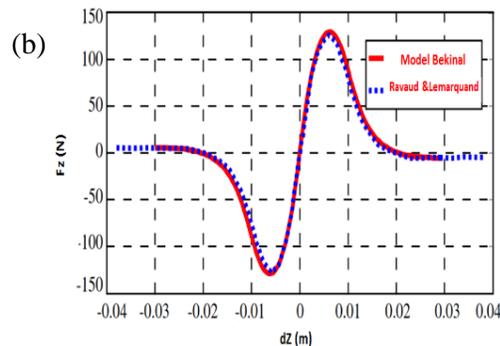
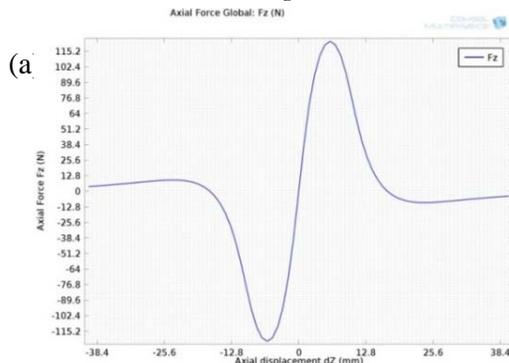
Tabel 2 Data spesifikasi magnet pada konfigurasi dasar *axial* PMB

| Spesifikasi | Magnet luar A | Magnet dalam B |
|----------------------------|--------------------------|--------------------|
| Radius luar (mm) | $R_4 = 101,6$ | $R_2 = 76,2$ |
| Radius dalam (mm) | $R_3 = 80,2; 81,2; 82,2$ | $R_1 = 50,8$ |
| Tinggi (mm) | $h_1 = 10; 20; 30$ | $h_0 = 10; 20; 30$ |
| Kerapatan fluks magnet (T) | $B_r = 1,4$ | $B_r = 1,4$ |



Gambar 4. Desain konfigurasi *axial* PMB

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi PMB dengan hasil analisa model Bekinal. Simulasi digunakan untuk menentukan nilai gaya aksial dari perpindahan arah aksial, dZ (*axial displacement*) dari PMB yang terbuat dari dua ring konsentris dengan arah polarisasi (B_r) seperti Gambar 2. Spesifikasi magnet untuk validasi model yaitu $R_1 = 10$ mm, $R_2 = 20$ mm, $R_3 = 22$ mm, $R_4 = 32$ mm, h_0 dan $h_1 = 10$ mm, $B_r = 1$ T.



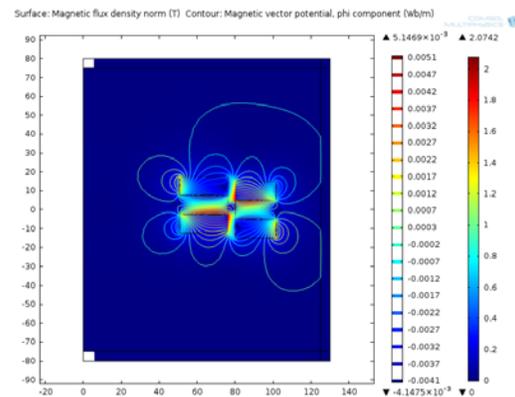
Gambar 5. Plot gaya aksial. (a) simulasi (b) model Bekinal

Tabel 3. Perbandingan hasil konfigurasi PMB polarisasi radial

| | Simulasi | Bekinal | Variasi (%) |
|-----------------|----------|---------|-------------|
| | | [8] | |
| Gaya aksial (N) | 123,42 | 128,94 | 3,21 |

Gambar. 5.a dan Gambar. 5.b menunjukkan plot nilai gaya aksial hasil simulasi dan model Bekinal yang memiliki nilai mendekati sama, dan trend kurva yang sama. Tabel 2 menunjukkan bahwa hasil nilai gaya aksial maksimum yang diperoleh dari pemodelan mendekati sama dengan model Bekinal. Ketidaccocokan dari kedua hasil metode tersebut sebesar 3,21 %, sehingga metode simulasi dinyatakan valid untuk menghitung gaya aksial.

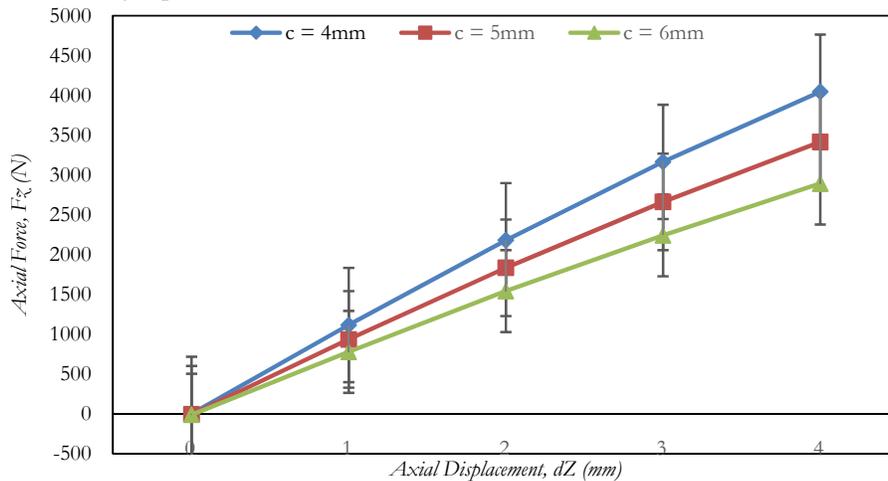
3.3. Simulasi desain *Axial* PMB tebal magnet 10 mm



Gambar 6. Kerapatan fluks magnet dan vektor potensial magnet dari *axial* PMB b 10 mm, c 4 mm

Gambar 6 merupakan plot kerapatan fluk magnet dan vektor potensial magnet pada dZ sejauh 4 mm. Plot pada gambar menunjukkan daerah magnet yang berwarna merah memiliki kerapatan fluk magnet maksimum sebesar 1,4 T, sedangkan bagian magnet berwarna biru memiliki kerapatan fluk magnet minimum yaitu 0 T. Garis vektor berwarna merah menunjukkan nilai positif maksimum vektor potensial magnet, sedangkan garis vektor berwarna biru tua menunjukkan nilai negatif maksimum.

Gambar 7 merupakan plot gaya aksial hasil simulasi *axial* PMB pada tebal magnet 10 mm dengan variasi lebar celah magnet “ c ” (4 mm; 5 mm; 6 mm) dan pengaturan jarak dZ 0 mm s.d. 4 mm dengan diskrit 1 mm. Nilai F_z maksimum yang dihasilkan oleh c 4 mm



Gambar 7. Plot gaya aksial-*displacement* dari *axial* PMB, dengan b 10 mm

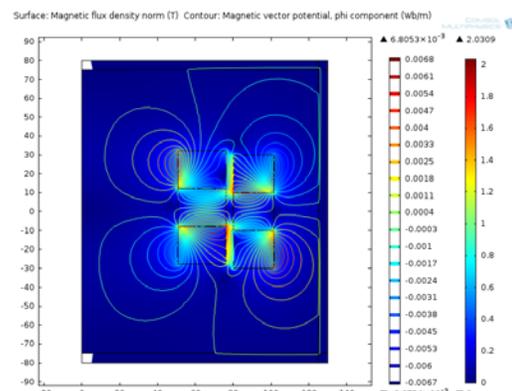
Plot gaya aksial-*displacement* diatas memberikan kesimpulan bahwa semakin kecil celah antara magnet *axial* PMB, maka gaya aksial yang dihasilkan akibat perpindahan (*displacement*) *inner magnet* terhadap *outer magnet* semakin besar. Analisa tersebut sesuai dengan penelitian Kriswanto tentang analisa gaya radial pada radial PMB bahwa semakin besar jarak *displacement* rotor magnet terhadap stator magnet pada arah radial atau semakin kecil jarak celah antar kedua magnet maka gaya radial yang dihasilkan semakin besar (Kriswanto et al., 2013).

3.4. Simulasi desain *Axial* PMB tebal magnet 20 mm

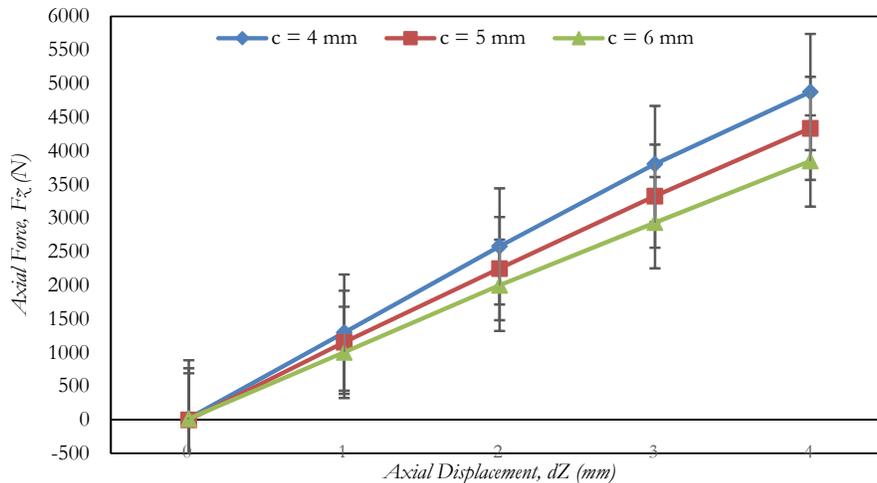
Gambar 8 menunjukkan daerah magnet yang berwarna merah pada desain *axial* PMB yang tersusun dari magnet tebal 20 mm memiliki kerapatan fluk magnet maksimum yaitu 1,4 T,

pada dZ 4 mm sebesar 4044,99 N, sedangkan yang dihasilkan oleh c 5 mm adalah 3415,16 N dan yang dihasilkan c 6 mm adalah 2892,27 N. Gaya aksial poros utama TASH sebesar 2784 N dapat ditumpu oleh *axial* PMB pada c 4 mm dengan dZ 2,6 mm, sedangkan pada c 5 mm memerlukan jarak dZ 3,14 mm dan pada c 6 mm memerlukan jarak dZ lebih besar yaitu 3,81 mm. Ketiga hasil analisa tersebut tidak memenuhi kriteria penerimaan *displacement* ($dZ \leq 2,5$ mm), sehingga ketiga desain tersebut tidak dapat digunakan sebagai bearing poros utama TASH.

sedangkan bagian magnet berwarna biru memiliki kerapatan fluk magnet minimum yaitu 0 T.



Gambar 8. Kerapatan fluk magnet dan vektor potensial magnet dari *axial* PMB b 20 mm, c 4 mm



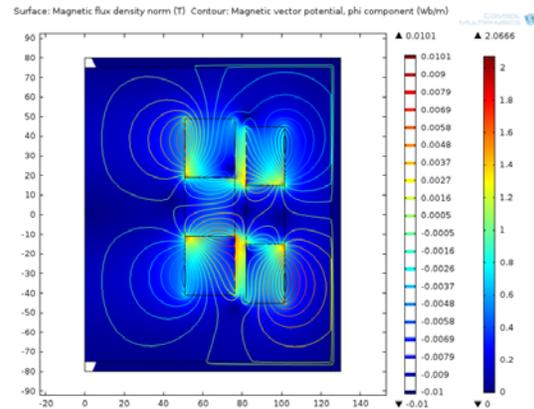
Gambar 9. Plot gaya aksial-displacement dari *axial* PMB b 20 mm, c 4

Gambar 9 merupakan plot gaya aksial-displacement dari simulasi *axial* PMB pada tebal magnet 20 mm dengan variasi lebar celah magnet “ c ” (4 mm; 5 mm; 6 mm) dan pengaturan jarak dZ 0 mm s.d. 4 mm dengan diskrit 1 mm. Nilai F_z maksimum sebesar 4875,55 N dihasilkan oleh c 4 mm pada dZ 4 mm, sedangkan pada c 5 mm menghasilkan 4335,19 N, dan c 6 mm menghasilkan 3848,81 N. Gaya aksial poros utama TASH sebesar 2784 N dapat ditumpu oleh *axial* PMB pada c 4 mm dengan dZ 2,17 mm, sedangkan pada c 5 mm memerlukan jarak dZ 2,47 mm dan pada c 6 mm memerlukan jarak dZ lebih besar yaitu 2,84 mm.

Berdasarkan hasil analisa tersebut maka lebar celah magnet yang memenuhi kriteria penerimaan displacement ($dZ \leq 2,5$ mm) adalah lebar celah magnet c 4 mm dan c 5 mm. Semakin kecil jarak celah antara magnet *axial* PMB, maka gaya aksial yang dihasilkan akibat perpindahan (displacement) *inner magnet* terhadap *outer magnet* semakin besar. Jika dibandingkan hasil simulasi desain *axial* PMB pada tebal magnet “ b ” 10 mm (Gambar 7) dan 20 mm (Gambar 9) pada tiap celah magnet memberikan kesimpulan bahwa magnet tebal 20 mm menghasilkan gaya aksial yang lebih besar dari magnet tebal 10 mm.

3.5. Simulasi desain *Axial* PMB tebal magnet 30 mm

Gambar 10 merupakan plot kerapatan fluk magnet dan vektor potensial magnet pada dZ sejauh 4 mm. Plot pada gambar tersebut menunjukkan daerah magnet yang berwarna merah memiliki kerapatan fluk magnet maksimum yaitu 1,4 T, sedangkan bagian magnet berwarna biru memiliki kerapatan fluk magnet minimum yaitu 0 T.

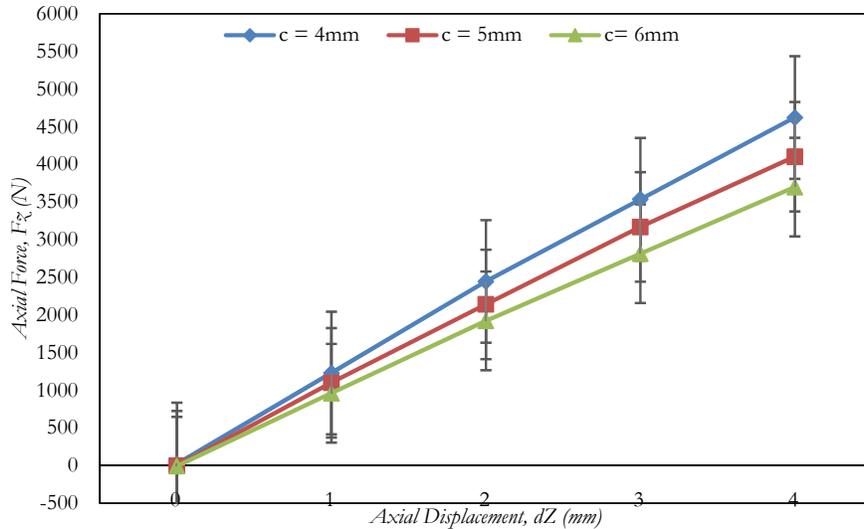


Gambar 10. Kerapatan fluk magnet dan vektor potensial magnet dari *axial* PMB b 30 mm, c 4 mm

Gambar 11 merupakan plot gaya aksial-displacement hasil simulasi *axial* PMB pada tebal magnet 30 mm dengan variasi lebar celah magnet “ c ” (4 mm; 5 mm; 6 mm) dan pengaturan jarak dZ 0 mm s.d. 4 mm dengan diskrit 1 mm. Nilai F_z maksimum sebesar 4623,16 N dihasilkan oleh c 2mm pada dZ 4 mm. Gaya aksial poros utama TASH sebesar 2784 N dapat ditumpu oleh *axial* PMB pada c 4 mm dengan dZ 2,3 mm, sedangkan pada c 5 mm memerlukan jarak dZ 2,6 mm dan pada c 6 mm memerlukan jarak dZ lebih besar yaitu 2,96 mm.

Berdasarkan hasil analisa tersebut maka lebar celah magnet yang memenuhi kriteria penerimaan displacement ($dZ \leq 2,5$ mm) adalah lebar celah magnet, c 4 mm. Semakin kecil celah antara magnet *axial* PMB, maka gaya aksial yang dihasilkan akibat perpindahan (displacement) *inner magnet* terhadap *outer magnet* semakin besar.

Gambar 11 merupakan plot gaya aksial-displacement hasil simulasi *axial* PMB pada tebal magnet 30 mm dengan variasi lebar celah magnet “ c ” (4 mm; 5 mm; 6 mm) dan pengaturan jarak dZ 0 mm s.d. 4 mm dengan diskrit 1 mm.



Gambar 11. Plot gaya aksial-displacement dari axial PMB h 30 mm, c 4 mm

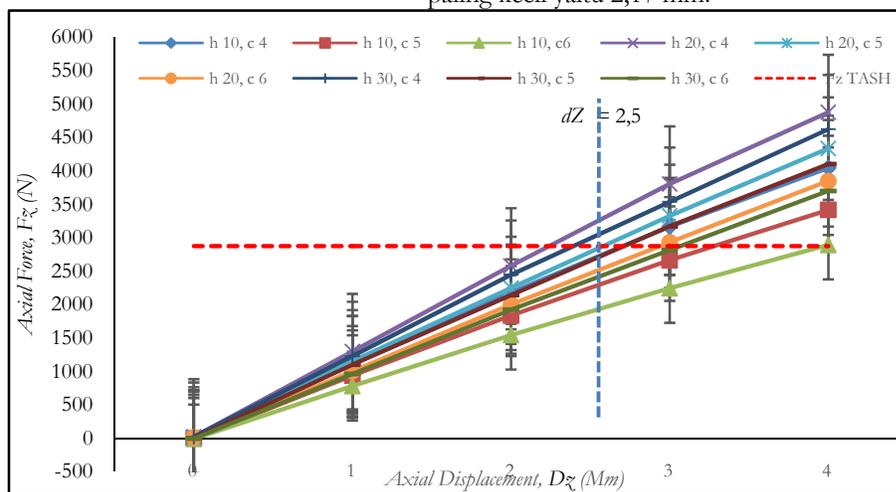
Nilai F_z maksimum sebesar 4623,16 N dihasilkan oleh c 2 mm pada dZ 4 mm. Gaya aksial poros utama TASH sebesar 2784 N dapat ditumpu oleh axial PMB pada c 4 mm dengan dZ 2,3 mm, sedangkan pada c 5 mm memerlukan jarak dZ 2,6 mm dan pada c 6 mm memerlukan jarak dZ lebih besar yaitu 2,96 mm. Berdasarkan hasil analisa tersebut maka lebar celah magnet yang memenuhi kriteria penerimaan displacement ($dZ \leq 2,5$ mm) adalah lebar celah magnet, c 4 mm. Semakin kecil celah antara magnet axial PMB, maka gaya aksial yang dihasilkan akibat perpindahan (displacement) inner magnet terhadap outer magnet semakin besar.

3.6. Optimasi Desain Axial PMB

Nilai gaya aksial (F_z) terhadap axial displacement (dZ) pada desain axial PMB dengan variasi tebal magnet dan celah magnet disimulasikan menggunakan metode elemen hingga. Hasil gaya aksial, F_z maksimum pada masing-masing desain diperlihatkan pada Gambar 12.

Berdasarkan plot gaya aksial-displacement pada gambar 12 menunjukkan bahwa nilai F_z maksimum dihasilkan oleh desain axial PMB $h20-c4$ (tebal magnet 20 mm, celah magnet 4 mm).

Desain axial PMB yang mampu menumpu gaya aksial poros utama TASH sebesar 2784 N yang didapatkan dari simulasi antara lain: (a) desain axial PMB $h20-c4$; (b) desain axial PMB $h20-c5$ (tebal magnet 20 mm, celah magnet 5 mm), dan (c) desain axial PMB $h30-c4$ (tebal magnet 30 mm celah magnet 4 mm). Batasan/constraint pada desain axial PMB adalah $F_z = 2784$, $dZ \leq 2,5$ mm. Desain axial PMB $h20-c4$ menghasilkan gaya aksial F_z 2784 N pada dZ 2,17 mm, sedangkan axial PMB $h30-c4$ pada jarak dZ 2,47 mm, dan desain axial PMB $h30-c4$ pada jarak dZ 2,3 mm. Berdasarkan hasil analisa diatas dapat disimpulkan bahwa desain axial PMB $h20-c4$ merupakan desain axial PMB yang paling optimal karena menghasilkan F_z 2784 N pada displacement paling kecil yaitu 2,17 mm.



Gambar 12. Plot gaya aksial-displacement dari axial PMB

4. SIMPULAN

1. Spesifikasi desain *axial* PMB yang dapat menumpu gaya aksial poros utama turbin angin 10 kW sebesar F_x 2784 N dengan batas *displacement* 2,5 mm adalah desain *axial* PMB *b*20-*c*4 (tebal magnet 20 mm, celah magnet 4 mm) yang terdiri dari tiga *inner magnet* dan tiga *outer magnet* dengan besar polarisasi setiap magnet sebesar 1, 4 tesla. *Outer magnet* mempunyai dimensi diameter luar 203,2 mm, diameter dalam 160,4 mm, sedangkan diameter luar *inner magnet* 152,2 mm, diameter dalam 101,6 mm.
2. Simulasi gaya aksial dari desain *axial* PMB dengan variasi tebal magnet (*b* = 10 mm; 20 mm; 30 mm) dan celah magnet (*c* = 4 mm; 5 mm; 6 mm) menunjukkan bahwa desain *axial* PMB dengan *b* 20 mm dan *c* 4 mm menghasilkan gaya aksial yang optimal yaitu pada F_x 2784 N pada *displacement* (*dZ*) 2,17mm.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Axial Magnetic Bearing Using Permanent Magnets-Solved with COMSOL Multiphysics 5.0. pp 1-20. (<http://www.comsol.com>), diakses tanggal 1 April 2013.
- Bekinal, S.I., Anil, T.R., & Jana, S., 2013, Analysis of Radial Magnetized Permanent Magnet Bearing Characteristics. *Progress in Electromagnetic Research B*, Vol. 47, pp 87-105.
- Gong, X. & Xiao, W., 2011. Bearing Fault Detection For Direct-Drive Wind Turbines via Stator Current Spectrum Analysis, IEEE, Vol.11, pp. 313-318.
- Kriswanto, Murdani & Yudiono, H., 2014. Pemodelan Axial Permanent Magnetic Bearing untuk Aplikasi Turbin Angin Horizontal, *Jurnal Kompetensi Teknik*, Vol.6, pp11-16
- Kriswanto, Haryadi, Setiawan, J.D., & Jamari. 2013. Analysis of Radial Force and Rotational Speed Test of Radial Permanent Magnetic Bearing for Horizontal Axis Wind Turbine Applications, *2nd Engineering International Conference Unnes Proceeding*, pp. 26-30.
- Manwell, J.F., McGowan, J.G. & Rogers, A.L., 2009. "Wind Energy Explained Theory, Design and Application," Second Edition. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Ronitua, P., 2012. ESDMMAG edisi 4 "Energi Baru Terbarukan Suatu Kenajiban", ([http://prokum.esdm.go.id/ESDMMAG/ESDM%20Edisi%204 .pdf](http://prokum.esdm.go.id/ESDMMAG/ESDM%20Edisi%204.pdf)), diakses tanggal 18 Oktober 2012
- Sugiyono, A., 2014. Outlook Energi Indonesia 2014. Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi. Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
- Uboguhigh, E.A., 2010. "Hight Reliability and Low Friction Bearings for Wind Turbine" Mini-project report. Energy-research councils UK. The University of Sheffield. United Kingdom.