

Defleksi Vertikal Poros Turbin Angin Multi Blade di Daerah Pedesaan- Bagian III: Kaji Teoritik dan Numerik

Viktus Kolo Koten^{1,*}, Jeremias Mathias Leda¹

¹Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Makassar
Jl. Tanjung Alang No. 23 Makassar 90244
Email korespondensi: victus_koten@yahoo.com

Abstrak

Turbin angin multi blade adalah salah satu jenis turbin angin yang telah digunakan oleh para petani garam di Desa Paccelang, Kecamatan Bangkala, Kabupaten Jeneponto, Propinsi Sulawesi Selatan. Dalam operasinya, turbin sering mengalami resonansi akibat defleksi vertikal poros yang berlebihan. Artikel ini mengkaji dan mengidentifikasi parameter penyebab defleksi vertikal poros. Penelitian dilakukan secara teoritik dan numerik. Secara teoritik, penelitian dilakukan dengan memasukkan parameter yang bersesuaian ke dalam persamaan defleksi vertikal poros yang dijabarkan. Secara numerik, penelitian dilakukan dengan menggunakan software autodesk inventor. Hasil penelitian menunjukkan beberapa parameter penyebab defleksi vertikal poros secara berlebihan. Parameter penyebab defleksi vertikal poros yang diurut berdasarkan kontribusinya adalah pengecilan diameter poros, penambahan panjang poros, dan penambahan beban eksternal baik secara teoritis maupun secara numerik. Pengecilan diameter poros 2 mm memberikan kontribusi minimal terhadap defleksi poros sebesar 60,181 %, perpanjangan poros 2 mm memberikan kontribusi minimal terhadap defleksi poros sebesar 6,121 %, dan pembesaran beban 2 gram memberikan kontribusi minimal terhadap defleksi poros sebesar 0,02 %. Meskipun ada perbedaan hasil secara teoritik dan numerik, perbedaan tersebut sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Kata kunci: turbin angin, poros, defleksi.

Abstract

The multi-blade wind turbine is a type of wind turbine that has been used by salt farmers in Paccelang Village, Bangkala District, Jeneponto Regency, South Sulawesi Province. In operation, the turbine often experiences resonance due to excessive vertical deflection of the shaft. This article examines and identifies the parameters that cause vertical shaft deflection. Research was carried out theoretically and numerically. Theoretically, the research was carried out by entering the appropriate parameters into the described shaft vertical deflection equation. Numerically, the research was carried out using Autodesk Inventor software. The research results show that several parameters cause excessive vertical shaft deflection. The parameters causing the vertical deflection of the shaft which are sorted based on their contribution are reduction in shaft diameter, increase in shaft length, and increase in external load both theoretically and numerically. Reducing the shaft diameter by 2 mm provides a minimum contribution to the shaft deflection of 60.181%, extending the shaft by 2 mm provides a minimum contribution to the shaft deflection of 6.121%, and increasing the load by 2 grams provides a minimum contribution to the shaft deflection of 0.02%. Although there are differences in theoretical and numerical results, the differences are so small that they can be ignored.

Keywords: wind turbine, shaft, deflection.

1. Pendahuluan

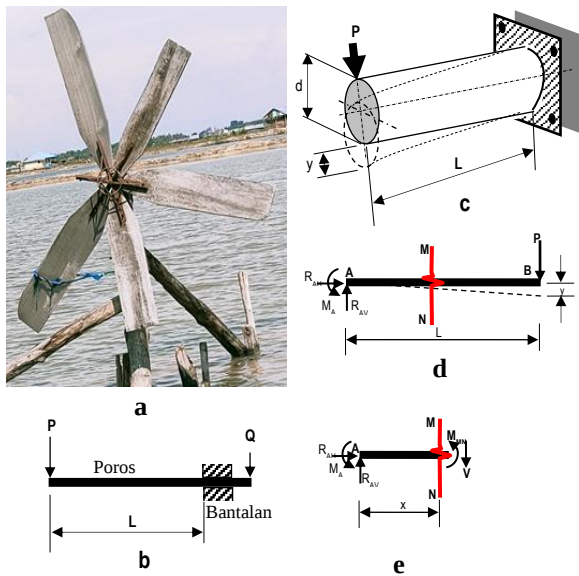
Gambar 1a memperlihatkan turbin angin multi blade yang telah digunakan oleh para petani garam di Desa Paccelang, Kecamatan Bangkala, Kabupaten Jeneponto, Propinsi Sulawesi Selatan. Meskipun telah direncanakan dan diaplikasikan secara baik pada awalnya, para petani tidak memiliki teknisi khusus untuk memperbaiki dan menjaga keberlanjutan kinerja turbin. Ketidakterediaan teknisi menyebabkan para petani sering memperbaiki dan mengganti elemen-elemen turbin yang mengalami kerusakan secara swadaya. Perbaikan dan pergantian elemen turbin yang tidak sesuai menyebabkan perubahan parameter-parameter yang telah ditentukan dan diijinkan dalam perencanaan turbin. Perubahan

parameter tersebut menyebabkan penurunan kinerja turbin. Salah satu penyebab penurunan kinerja adalah resonansi.

Resonansi pada turbin disebabkan oleh beberapa hal. Selain disebabkan oleh kerusakan pada bantalan, spie, blade, dan ketidak-seimbangan konstruksi, penyebab lain resonansi pada turbin adalah defleksi vertikal poros yang melebihi syarat batas minimal. Syarat batas defleksi poros minimal adalah 0,3 – 0,35 mm untuk tiap meter jarak antara tumpuan poros atau panjang poros. Syarat batas defleksi vertikal poros ini juga dipenuhi oleh para peneliti sebelumnya, [1- 3], sebesar 0.00016618 - 0,22551 mm untuk tiap meter panjang poros. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut dilakukan pada poros mesin secara

umum, pada poros gardan mobil, dan pada poros berbahan komposit yang memiliki bentuk geometrik dan ukuran yang berbeda dengan penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan mengidentifikasi parameter-parameter penyebab defleksi vertikal pada poros turbin angin.

Defleksi pada poros biasanya digunakan sebagai parameter desain [1-7], penentuan putaran kritis [8-10], deteksi keretakan [11-15], deteksi kelelahan [16-17], deteksi kelurusan [18-21], deteksi resonansi [22-25], penentuan hubungan antara dua jenis defleksi [26], penentuan karakteristik getaran [27-33], dan penggunaan lainnya.



Gambar 1. Turbin angin multi blade dan poros.

Gambar 1b memperlihatkan konstruksi teoritik suatu poros yang dibebani dengan sistem cantilever. Sistem pembebanan cantilever seperti ini juga telah dilakukan oleh Dinesh Satpute dkk [12], [34-35]. P adalah beban eksternal sebelah kiri bantalan seperti berat rangka dan berat sudu gerak (blade). Q adalah berat batang penghubung pompa torak.

Poros bagian kanan bantalan pada gambar 1b yang diperlakukan sebagai spindel sehingga konstruksi poros yang dianalisis hanya bagian kiri bantalan seperti pada gambar 1c. Dalam penyelesaian persoalan defleksi vertikal poros, poros digambarkan sebagai diagram benda bebas seperti gambar 1d. Dari sistem kesetimbangan gaya dan momen, menghasilkan $R_{AV} = P$, $R_{AH} = 0$, dan $M_A = PL$. Untuk mengetahui momen pada sembarang titik di sepanjang bentangan poros, poros dipotong dan diperlihatkan seperti pada gambar 1e. Kesetimbangan momen pada potongan M_N menghasilkan $-PL + Px - M = 0$. Nilai M hasil hitungan dimasukkan ke (1) yang telah diturunkan oleh V. K. Koten dan D. Hasan [26] sehingga menghasilkan (2).

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (1)$$

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = PL - Px \quad (2)$$

Integral pertama dan ke dua dari (2) menghasilkan (3) dan (4) secara berturut-turut,

$$EI \frac{dy}{dx} = PLx - \frac{Px^2}{2} + C_1 \quad (3)$$

$$EIy = \frac{PLx^2}{2} - \frac{Px^3}{6} + C_1x + C_2 \quad (4)$$

Dengan memasukkan beberapa kondisi batas ke (3) dan (4) menghasilkan (6). Pada $x = 0$ maka $dy/dx = 0$ sehingga (3) sama dengan nol; diperoleh $C_1 = 0$. Pada $x = 0$ maka $y = 0$ sehingga (4) sama dengan nol; diperoleh $C_2 = 0$. Dengan memasukkan nilai C_1 dan C_2 ke dalam (4), menghasilkan persamaan umum defleksi vertikal pada (5). Dengan memasukkan $x = L$ pada (5) menghasilkan persamaan defleksi vertikal poros seperti diperlihatkan pada (6).

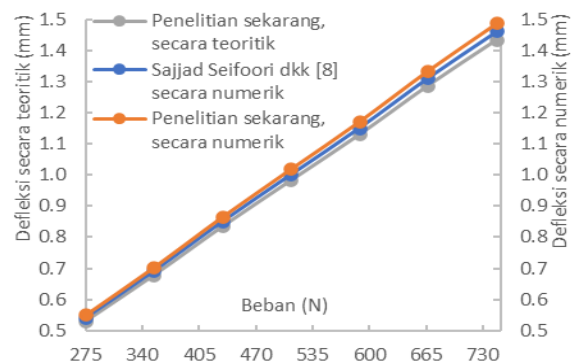
$$y = \frac{1}{EI} \left[\frac{PLx^2}{2} - \frac{Px^3}{6} \right] \quad (5)$$

$$y = \frac{1}{EI} \left[\frac{PL^3}{3} \right] \quad (6)$$

I, E, L, P, dan y berturut-turut adalah momen tahanan lentur; $I = \pi d^4/64$, modulus elastis, panjang, beban, dan defleksi vertikal poros.

2. Metode

Metode penelitian diawali dengan validasi data. Data divalidasi dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Sajjad Seifoori dkk [16]. Hasil validasi data diperlihatkan dalam bentuk grafik pada gambar 2.



Gambar 2. Validasi data.

Penelitian secara teoritik dilakukan dengan memasukkan parameter penelitian seperti beban

eksternal, panjang poros, diameter poros, dan modulus elastis bahan poros dengan urutan tertentu ke dalam (6) untuk memperoleh defleksi vertikal. Parameter beban eksternal (P) dalam kajian ini terdiri dari 5, 10, 15, 20, dan 25 kg. Panjang poros (L) terdiri dari 100, 150, dan 200 mm. Diameter poros (D) terdiri dari 16, 18, dan 20 mm. Modulus elastis (E) bahan besi cor sebesar 12.844.036 gram/mm².

Pada (6) terdiri dari dua ruas utama; ruas kiri (defleksi vertikal) dan ruas kanan (variasi berbagai parameter). Ruas kiri sebagai variabel tidak bebas dan ruas kanan sebagai variabel bebas. Karena grafik yang terbentuk hanya dua sumbu; sumbu vertikal dan sumbu horizontal, beberapa parameter di ruas kanan dikonstantkan dan membiarkan satu parameter saja yang menjadi variabel penentu defleksi vertikal pada ruas kiri. Aplikasi dari pernyataan tersebut dapat diuraikan seperti pada (7), (8), dan (9).

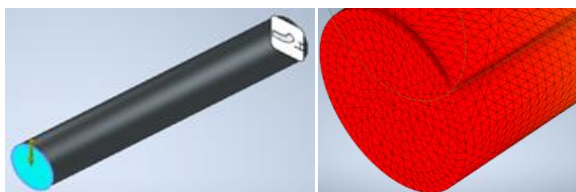
$$y = K_1 P \quad (7)$$

$$y = K_2 L^3 \quad (8)$$

$$y = K_3 / d^4 \quad (9)$$

K_1 , K_2 , dan K_3 adalah konstanta-konstanta hasil perhitungan variasi variabel pada ruas kanan (6) kecuali beban eksternal, panjang poros, dan diameter poros secara berturut-turut. Semua hasil defleksi vertikal yang ditunjukkan pada sumbu sebelah kiri tiap grafik pada gambar 5-10 diperoleh melalui penerapan (7), (8), dan (9).

Secara numerik, penelitian dilakukan melalui penggunaan software autodesk inventor versi edukatif. Urutan penelitian terdiri dari pembentukan model poros, pemilihan bahan poros, penentuan jenis tumpuan, penentuan jenis beban dan posisi pembebanan, pembagian elemen, analisis dan simulasi, pengecekan hasil, dan penyimpanan. Parameter beban eksternal, panjang poros, diameter poros, dan modulus elastis diinput dan divariasikan seperti pada cara teoritis.



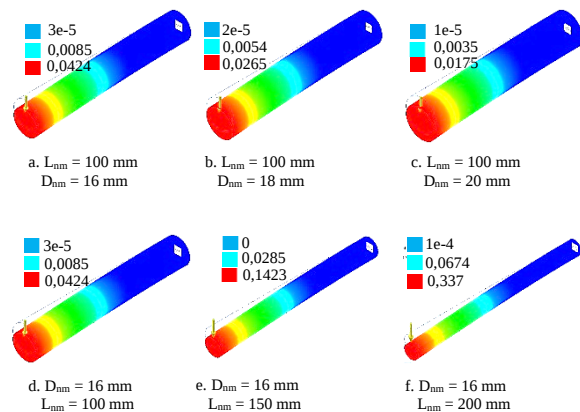
Gambar 3. Model poros dan pembagian elemen.

Gambar 3a memperlihatkan model poros terbebani yang dimodel secara numerik. Gambar 3b memperlihatkan poros yang dibagi dalam sejumlah elemen. Poros yang sudah diberi kondisi batas dan dibagi-bagi menjadi bagian yang kecil disimulasi untuk mendapatkan defleksi vertikal poros.

Gambar 4a, 4b, dan 4c memperlihatkan proses simulasi defleksi vertikal poros untuk panjang 100 mm dan diameter poros berturut-turut 16, 18, dan 20

mm. Gambar 4d, 4e, dan 4f memperlihatkan proses simulasi defleksi vertikal poros untuk diameter 16 mm dan panjang poros berturut-turut 100, 150, dan 200 mm. Semua hasil defleksi vertikal poros yang ditunjukkan pada sumbu sebelah kanan tiap grafik pada gambar 5-10 diperoleh melalui cara ini.

Penggunaan singkatan seperti L_{th} , L_{nm} , D_{th} , D_{nm} , P_{th} , dan P_{nm} dalam gambar 5-10 berturut-turut adalah panjang poros secara teoritis, panjang poros secara numerik, diameter poros secara teoritis, diameter poros secara numerik, beban secara teoritis, dan beban secara numerik.



Gambar 4. Defleksi pada berbagai diameter dan panjang poros.

3. Hasil dan Pembahasan.

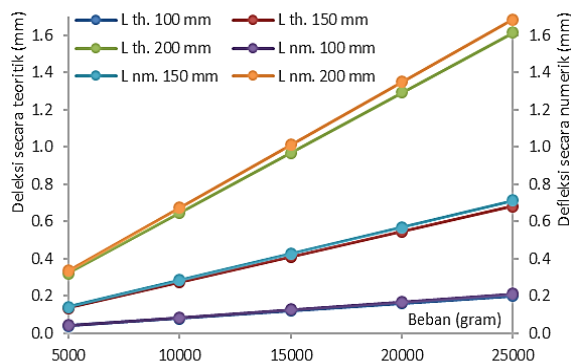
Hasil kajian memperlihatkan defleksi vertikal poros yang disebabkan oleh variasi dari berbagai parameter yang diuraikan dalam 6 (enam) bagian; defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan beban dan panjang poros pada diameter poros yang tetap, perubahan beban dan diameter poros pada panjang poros yang tetap, perubahan panjang poros dan beban pada diameter poros yang tetap, perubahan panjang dan diameter poros pada beban yang tetap, perubahan diameter poros dan beban pada panjang poros yang tetap, dan defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan diameter poros dan panjang poros pada beban yang tetap.

Defleksi Poros Akibat Perubahan Beban dan Panjang Poros pada Diameter Poros yang Tetap.

Bagian penelitian ini memiliki kemiripan dengan penelitian yang dilakukan oleh Sajjad Seifoori dkk [16]. Seperti yang diperlihatkan pada validasi data pada gambar 2, defleksi poros secara numerik dalam kajian ini lebih besar 1.76 % dari pada yang dilakukan oleh Sajjad Seifoori dkk [16]. Defleksi poros secara teoritik pada penelitian ini lebih kecil 1.85 % dari pada yang dilakukan oleh Sajjad Seifoori dkk [16].

Gambar 5 memperlihatkan grafik perubahan defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan beban dan panjang poros pada diameter poros 16 mm. Semua garis grafik yang terbentuk menunjukkan hubungan yang linier antara perubahan defleksi poros dengan

perubahan beban eksternal pada berbagai panjang poros baik secara teoritis maupun numerik. Berdasarkan (7), kurva yang terbentuk adalah kurva derajat pertama atau kurva garis lurus. Setiap penambahan beban satu satuan dapat meningkatkan defleksi poros sebesar satu satuan pula. Pada panjang poros yang berbeda, hubungan linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan beban masi terjadi namun memiliki nilai yang berbeda. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin besar beban dan panjang poros, defleksi poros semakin besar pula.



Gambar 5. Defleksi poros akibat perubahan beban dan panjang poros pada diameter poros 16 mm.

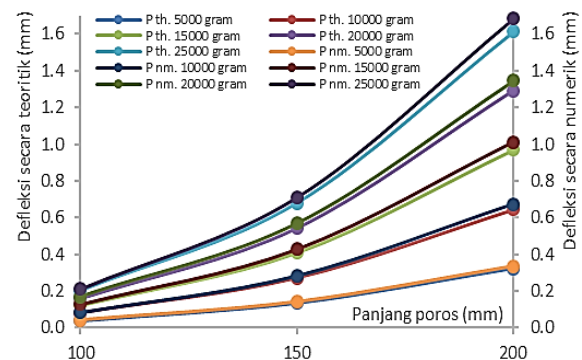
Perbedaan defleksi poros secara teoritis dan numerik sangat kecil untuk tiap perubahan beban dan panjang poros. Pada beban 5.000 gram dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 5.0378, 4.4753, dan 4.3812 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 10.000 gram dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 5.0255, 4.5119, dan 4.3812 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 15.000 gram dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 5.0626, 4.4977, dan 4.3812 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 20.000 gram dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 5.0006, 4.5119, dan 4.3812 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 25.000 gram dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 5.0626, 4.5341, dan 4.3812 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin besar beban dan panjang poros, itu tidak mempengaruhi perbedaan defleksi yang diperoleh secara numerik dan teoritis.

Fenomena defleksi poros secara numerik dan teoritis serta perubahannya yang terjadi pada diameter poros 16 mm juga terjadi pada diameter poros 18 dan 20 mm tapi memiliki nilai yang berbeda.

Defleksi Poros Akibat Perubahan Panjang Poros dan Beban pada Diameter Poros yang Tetap.

Gambar 6 memperlihatkan grafik perubahan defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan panjang poros

dan beban pada diameter poros 16 mm. Semua garis grafik yang terbentuk menunjukkan hubungan yang tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan panjang poros pada berbagai beban eksternal baik secara teoritis maupun numerik. Berdasarkan (8), kurva yang terbentuk adalah kurva derajat ke tiga. Setiap penambahan panjang sebesar satu satuan dapat meningkatkan defleksi poros sebesar pangkat tiga dari panjang poros. Pada panjang poros yang berbeda, hubungan tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan panjang masi terjadi namun memiliki nilai yang berbeda. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang poros dan semakin besar beban, semakin besar pula defleksi poros.



Gambar 6. Defleksi poros akibat perubahan panjang poros dan beban pada diameter poros 16 mm.

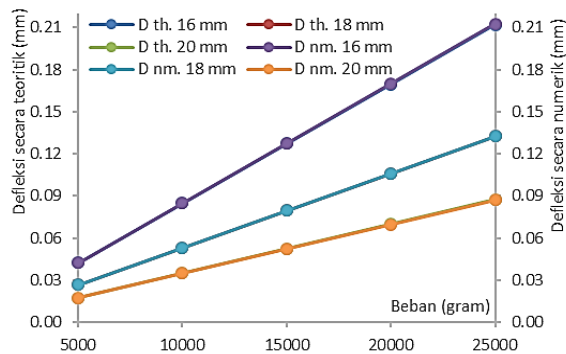
Perbedaan defleksi poros secara teoritis dan numerik sangat kecil untuk tiap perubahan panjang poros dan beban. Pada panjang poros 100 mm dan beban 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, dan 25.000 gram, defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 5.0378, 5.0254, 5.0626, 5.0001, dan 5.0626 % dari pada defleksi poros secara teoritis. Pada panjang poros 150 mm dan beban 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, dan 25.000 gram, defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 4.4752, 4.5119, 4.4997, 4.5119, dan 4.534 % dari pada defleksi poros secara teoritis. Pada panjang poros 200 mm dan beban 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, dan 25.000 gram, defleksi poros secara numerik lebih besar 4.3812 % dari pada defleksi poros secara teoritis. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang poros dan semakin besar beban, itu tidak mempengaruhi perbedaan defleksi secara numerik dan teoritis.

Fenomena defleksi poros secara numerik dan teoritis, serta perubahannya yang terjadi pada diameter poros 16 mm juga terjadi pada diameter poros 18 dan 20 mm tapi memiliki nilai yang berbeda.

Defleksi Poros Akibat Perubahan Beban dan Diameter Poros pada Panjang Poros yang Tetap.

Gambar 7 memperlihatkan grafik perubahan defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan beban dan diameter poros pada panjang poros 100 mm. Semua garis grafik yang terbentuk menunjukkan hubungan yang linier antara perubahan defleksi poros dengan

perubahan beban eksternal pada berbagai diameter poros baik secara teoritis maupun numerik. Berdasarkan (7), kurva yang terbentuk adalah kurva derajat pertama atau kurva garis lurus. Setiap penambahan beban satu satuan dapat meningkatkan defleksi poros sebesar satu satuan pula. Pada diameter poros yang berbeda, hubungan linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan beban masi terjadi namun memiliki nilai yang berbeda. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin besar beban dan semakin kecil diameter poros, semakin besar defleksi poros.



Gambar 7. Defleksi poros akibat perubahan beban dan diameter poros pada panjang poros 100 mm.

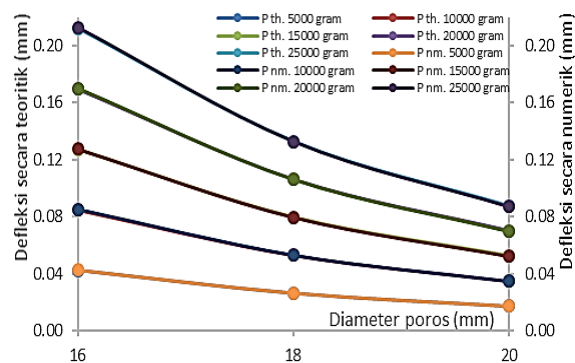
Perbedaan defleksi poros secara teoritis dan numerik sangat kecil untuk tiap perubahan beban dan diameter poros. Pada beban 5.000 gram dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.288, 0.038, dan 0.27 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 10.000 gram dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.299, 0.019, dan 0.298 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 15.000 gram dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.264, 0.025, 0.289, % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 20.000 gram dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.323, 0.057, dan 0.284 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Pada beban 25.000 gram dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.264, 0.001, dan 0.304 % dari pada defleksi vertical secara teoritis. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin besar beban dan semakin kecil diameter poros, itu tidak mempengaruhi perbedaan defleksi yang diperoleh secara numerik dan teoritis.

Fenomena defleksi poros secara numerik dan teoritis serta perubahannya yang terjadi pada panjang poros 100 mm juga terjadi pada panjang poros 150 dan 200 mm tapi memiliki nilai yang berbeda.

Defleksi Poros Akibat Perubahan Diameter poros dan Beban pada Panjang Poros yang Tetap.

Gambar 8 memperlihatkan grafik perubahan defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan diameter poros

dan beban pada panjang poros 100 mm. Semua garis grafik yang terbentuk menunjukkan hubungan yang tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan diameter poros pada berbagai beban eksternal baik secara teoritis maupun numerik. Berdasarkan (9), kurva yang terbentuk adalah kurva derajat negatif ke empat. Setiap penambahan diameter poros satu satuan dapat menurunkan defleksi poros sebesar pangkat empat dari diameter poros. Pada panjang poros yang berbeda, hubungan tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan beban masi terjadi namun memiliki nilai yang berbeda. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin besar diameter poros dan semakin kecil beban eksternal, semakin kecil defleksi poros.



Gambar 8. Defleksi poros akibat perubahan diameter poros dan beban pada panjang poros 100 mm.

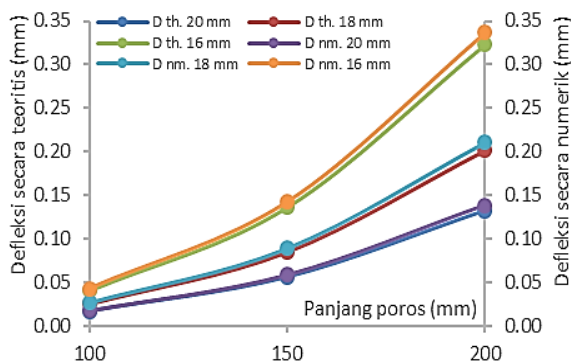
Perbedaan defleksi poros secara teoritis dan numerik sangat kecil untuk tiap perubahan diameter poros dan beban. Pada diameter poros 16 mm dan beban 5.000 10.000, 15.000, 20.000, dan 25.000 gram, defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.2876, 0.2994, 0.264, 0.3231, dan 0.264 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Pada diameter poros 18 mm dan beban 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, dan 25.000 gram, defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.0376, 0.0188, 0.0251, 0.0565, dan 0.0001 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Pada diameter poros 20 mm dan beban 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, dan 25.000 gram, defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.2698, 0.2983, 0.2888, 0.2841, dan 0.3041 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil diameter poros dan semakin besar beban eksternal, itu tidak mempengaruhi prosentasi perbedaan defleksi poros secara numerik dan teoritis.

Fenomena defleksi poros secara numerik dan teoritis serta perubahannya yang terjadi pada panjang poros 100 mm juga terjadi pada panjang poros 150 dan 200 mm tapi memiliki nilai yang berbeda.

Defleksi Poros Akibat Perubahan Panjang dan Diameter Poros pada Beban yang Tetap.

Gambar 9 memperlihatkan grafik perubahan defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan panjang dan diameter poros pada beban 5.000 gram. Semua garis

grafik yang terbentuk menunjukkan hubungan yang tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan panjang poros pada berbagai diameter poros baik secara teoritis maupun numerik. Berdasarkan (8), kurva yang terbentuk adalah kurva derajat ke tiga. Setiap penambahan panjang poros satu satuan dapat meningkatkan defleksi poros sebesar pangkat tiga dari panjang poros. Pada panjang poros yang berbeda, hubungan tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan beban masi terjadi namun memiliki nilai yang berbeda. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang poros dan semakin kecil diameter poros, semakin besar defleksi poros.



Gambar 9. Defleksi poros akibat perubahan panjang dan diameter poros pada beban 5.000 gram.

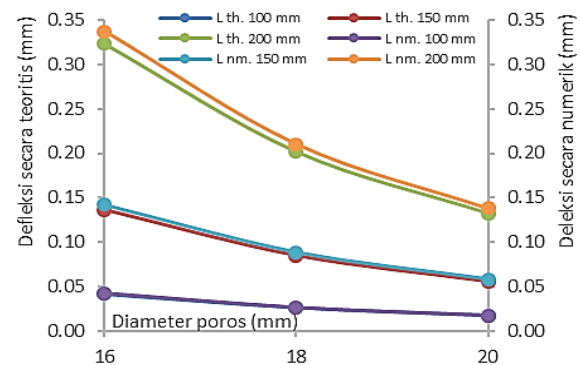
Perbedaan defleksi poros secara teoritis dan numerik sangat kecil untuk tiap perubahan panjang dan diameter poros. Pada panjang poros 100 mm dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 5.0378, 5.3003, dan 5.6249 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Pada panjang poros 150 mm dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm, defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 4.4752, 4.6079, dan 4.7332 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Pada panjang poros 200 mm dan diameter poros 16, 18, dan 20 mm, defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 4.3812, 4.4371, dan 4.5058 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang poros dan semakin kecil diameter poros, itu tidak mempengaruhi perbedaan defleksi poros secara numerik dan teoritis.

Fenomena defleksi poros secara numerik dan teoritis, serta perubahannya yang terjadi pada beban 5.000 gram juga terjadi pada beban 15.000 dan 25.000 gram tapi memiliki nilai yang berbeda.

Defleksi Poros akibat Perubahan Diameter dan Panjang Poros pada Beban yang Tetap.

Gambar 10 memperlihatkan grafik perubahan defleksi poros yang disebabkan oleh perubahan diameter dan panjang poros pada beban 5.000 gram. Semua garis grafik yang terbentuk menunjukkan hubungan yang tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan diameter poros pada berbagai panjang

poros baik secara teoritis maupun numerik. Berdasarkan (9), kurva yang terbentuk adalah kurva derajat negatif ke empat. Setiap penambahan diameter poros satu satuan dapat menurunkan defleksi poros sebesar pangkat empat dari diameter poros. Pada panjang poros yang berbeda, hubungan tidak linier antara perubahan defleksi poros dengan perubahan beban masi terjadi namun memiliki nilai yang berbeda. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin besar diameter poros dan semakin pendek poros, semakin kecil defleksi poros.



Gambar 10. Defleksi poros akibat perubahan diameter dan panjang poros pada beban 5.000 gram.

Perbedaan defleksi poros secara teoritis dan numerik sangat kecil untuk tiap perubahan diameter dan panjang poros. Pada diameter poros 16 mm dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.288, 4.4752, dan 4.3812 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Pada diameter poros 18 mm dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.038, 4.6079, dan 4.4371 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Pada diameter poros 20 mm dan panjang poros 100, 150, dan 200 mm defleksi poros secara numerik lebih besar berturut-turut 0.27, 4.7332, dan 4.5058 % dari pada defleksi poros secara teoritik. Analisis tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil diameter poros dan semakin panjang poros, itu tidak mempengaruhi prosentasi perbedaan defleksi poros secara numerik dan teoritis.

Fenomena defleksi poros secara numerik dan teoritis, serta perubahannya yang terjadi pada beban 5.000 gram juga terjadi pada beban 15.000 dan 25.000 gram tapi memiliki nilai yang berbeda.

4. Kesimpulan.

Parameter penyebab defleksi vertical poros yang diurut berdasarkan kontribusinya adalah pengecilan diameter poros, penambahan panjang poros, dan penambahan beban eksternal baik secara teoritis maupun secara numerik. Pengecilan diameter poros 2 mm memberikan kontribusi minimal terhadap defleksi poros sebesar 60,181 %, perpanjangan poros 2 mm memberikan kontribusi minimal terhadap defleksi poros sebesar 6,121 %, dan pembesaran beban 2 gram

memberikan kontribusi minimal terhadap defleksi poros sebesar 0,02 %. Secara keseluruhan, defleksi vertical poros secara numerik lebih besar dari pada secara teoritik. Meskipun demikian, perbedaan hasil secara teoritik dan numerik tersebut sangat kecil dan dapat diabaikan.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Atma Jaya (LPPM-UAJ) Makassar yang telah membiayai penelitian dan penulisan artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] S. O. Afolabi, B. I. Oladapo, C. O. Ijagbemi, A. O. M. Adeoye, and J. F. Kayode, "Design and Finite Element Analysis of A Fatigue Life Prediction for Safe and Economical Machine Shaft," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 105–111, 2019.
- [2] M. S. Kamboh, M. A. Machhi, and M. F. Kamboh, "Design and Analysis of Drive Shaft with a Critical Review of Advance Composite Materials and the Root Causes of Shaft Failure," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, no. June, pp. 3897–3907, 2020.
- [3] A. Ravi, "Design, Comparison, and Analysis of a Composite Drive Shaft for an Automobile," *Int. Rev. Appl. Eng. Res.*, vol. 4, no. 1, pp. 21–28, 2014.
- [4] G. S. Payne, T. Stallard, and R. Martinez, "Design and Manufacture of A Bed Supported Tidal Turbine Model for Blade and Shaft Load Measurement in Turbulent Flow and Waves," *Renew. Energy*, vol. 107, pp. 312–326, 2017.
- [5] Y. G. Kim and U. K. Kim, "Design and Analysis of the Propulsion Shafting System in A Ship With Single Stern Tube Bearing," *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 536–548, 2020.
- [6] P. Karthikeyan, R. Gobinath, L. Ajith Kumar, and D. Xavier Jenish, "Design and Analysis of Drive Shaft using Kevlar/Epoxy and Glass/Epoxy as a Composite Material," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 197, no. 1, 2017.
- [7] C. Elanchezhian, B. Vijaya Ramnath, K. N. Sripada Raghavendra, M. Muralidharan, and G. Rekha, "Design and Comparison of the Strength and Efficiency of Drive Shaft made of Steel and Composite Materials," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 1, pp. 1000–1007, 2018.
- [8] H. Heydari and A. Khorram, "Effects of Location and Aspect Ratio of A Flexible Disk on Natural Frequencies and Critical Speeds of A Rotating Shaft-Disk System," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 152, no. January 2018.
- [9] D. Gayen, D. Chakraborty, and R. Tiwari, "Whirl Frequencies and Critical Speeds of A Rotor-Bearing System with A Cracked Functionally Graded Shaft – Finite Element Analysis," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 61, pp. 47–58, 2017.
- [10] S. Gorbatyuk, V. Kondratenko, and L. Sedykh, "Influence of Critical Speed when Working Shafts with Asymmetrically Located Monolithic Weighting on the Accuracy of Work Surfaces," *Mater. Today Proc.*, vol. 19, no. xxxx, pp. 2117–2120, 2019.
- [11] V. M. Bansode and M. Billore, "Crack Detection in A Rotary Shaft Analytical and Experimental Analyses: A Review," *Mater. Today Proc.*, vol. 47, no. xxxx, pp. 6301–6305, 2021.
- [12] D. Satpute, P. Baviskar, P. Gandhi, M. Chavanke, and T. Aher, "Crack Detection in Cantilever Shaft Beam Using Natural Frequency," *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 2, pp. 1366–1374, 2017.
- [13] S. S. Jadhav, S. S. Jadhav, and S. B. Sharma, "Influence of Cracks on Shaft : A Review," *Irjet*, vol. 03, no. 08, pp. 1498–1501, 2016.
- [14] H. Khorrami, S. Rakheja, and R. Sedaghati, "Vibration Behavior of A Two-Crack Shaft in A Rotor Disc-Bearing System," *Mech. Mach. Theory*, vol. 113, pp. 67–84, 2017.
- [15] S. K. Singh and R. Tiwari, "Detection and Localisation of Multiple Cracks in A Shaft System: An Experimental Investigation," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 53, pp. 182–193, 2014.
- [16] S. Seifoori, A. Mahdian Parrany, and M. Khodayari, "A High-Cycle Fatigue Failure Analysis for the Turbocharger Shaft of BELAZ 75131 Mining Dump Truck," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 116, no. July, p. 104752, 2020.
- [17] M. Fonte, P. Duarte, V. Anes, M. Freitas, and L. Reis, "On the Assessment of Fatigue Life of Marine Diesel Engine Crankshafts," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 56, pp. 51–57, 2015.
- [18] J. ung Lee, B. Jeong, and T. H. An, "Investigation on Effective Support Point of Single Stern Tube Bearing for Marine Propulsion Shaft Alignment," *Mar. Struct.*, vol. 64, no. December 2017, pp. 1–17, 2019.
- [19] X. Wen, R. Zhou, and Q. Yuan, "Distortion of Shafting Bearings Loads in Hot Condition Based on Marine Shaft Alignment Theory," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 170, no. 4, 2018.
- [20] G. Lai, J. Liu, S. Liu, F. Zeng, R. Zhou, and J. Lei, "Comprehensive Optimization for the Alignment Quality and Whirling Vibration Damping of A Motor Drive Shafting," *Ocean Eng.*, vol. 157, no. July 2017, pp. 26–34, 2018.

- [21] H. C. Andersen and J. J. Zrodovvski, "Co-Ordinated Alignment of Line Shaft, Propulsion Gear, and Turbines," *Int. Shipbuild. Prog.*, vol. 12, no. 125, pp. 11–55, 2018.
- [22] D. Zou, C. Jiao, N. Ta, and Z. Rao, "Forced Vibrations of A Marine Propulsion Shafting with Geometrical Nonlinearity (Primary and Internal Resonances)," *Mech. Mach. Theory*, vol. 105, pp. 304–319, 2016.
- [23] R. Nicoletti, A. A. Cavalini, and V. Steffen, "Detection of Cracks in Rotating Shafts by Using the Combination Resonances Approach and the Approximated Entropy Algorithm," *Shock Vib.*, vol. 2018, 2018.
- [24] D. Zou, L. Liu, Z. Rao, and N. Ta, "Coupled Longitudinal-Transverse Dynamics of a Marine Propulsion Shafting under Primary and Internal Resonances," *J. Sound Vib.*, vol. 372, pp. 299–316, 2016.
- [25] D. Zou, Z. Rao, and N. Ta, "Coupled Longitudinal-Transverse Dynamics of A Marine Propulsion Shafting under Superharmonic Resonances," *J. Sound Vib.*, vol. 346, no. 1, pp. 248–264, 2015.
- [26] V. Koten and D. Hasan, "Penentuan Hubungan antara Defleksi Lateral dan Radial Poros Baja pada Berbagai Jenis Tumpuan secara Teoritik," *J. Ilm. Tek. Mesin Cylind.*, vol. 2, no. 1, pp. 57–63, 2014.
- [27] S. Xie, T. Zhou, H. Lu, Z. Li, M. Yang, and W. Wu, "Whirling Vibration Modeling for Propulsion Shafting," *IEEE Adv. Inf. Technol. Electron. Autom. Control Conf.*, vol. 2021, no. 1, pp. 1009–1013, 2021.
- [28] Z. Zhang, F. Chen, Z. Zhang, and H. Hua, "Analysis of Friction-Induced Vibration in A Propeller-Shaft System with Consideration of Bearing-Shaft Friction," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 228, no. 8, pp. 1311–1328, 2014.
- [29] Y. Yang, C. D. Che, and W. Y. Tang, "Shafting Coupled Vibration Research Based on Wave Approach," *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, vol. 19, no. 3, pp. 325–336, 2014.
- [30] X. Huang, Z. Su, and H. Hua, "Application of A Dynamic Vibration Absorber with Negative Stiffness for Control of A Marine Shafting System," *Ocean Eng.*, vol. 155, no. September 2017, pp. 131–143, 2018.
- [31] C. Lusty, N. Sahinkaya, and P. Keogh, "A Novel Twin-Shaft Rotor Layout with Active Magnetic Couplings for Vibration Control," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 230, no. 3, pp. 266–276, 2016.
- [32] H. Ma, Y. Lu, Z. Wu, X. Tai, and B. Wen, "Vibration Response Analysis of A Rotational Shaft-Disk-Blade System with Blade-Tip Rubbing," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 107, pp. 110–125, 2016.
- [33] V. M. Zaccardo and G. D. Buckner, "Active Magnetic Dampers for Controlling Lateral Rotor Vibration in High-Speed Rotating Shafts," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 152, p. 107445, 2021.
- [34] H. Ma, J. Zeng, Z. Lang, L. Zhang, Y. Guo, and B. Wen, "Analysis of the Dynamic Characteristics of A Slant-Cracked Cantilever Beam," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 75, pp. 261–279, 2016.
- [35] S. H. Gawande and R. R. More, "Effect of Notch Depth & Location on Modal Natural Frequency of Cantilever Beams," *Structures*, vol. 8, pp. 121–129, 2016.