

PENGUJIAN PROGRAM PREDIKSI KECEPATAN POROS ROTOR BERTINGKAT SECARA EKSPERIMENTAL

EXPERIMENTAL TESTING OF THE ROTOR SHAFT SPEED PREDICTION PROGRAM

Alexander Sembiring^{1)*}, Asnawi Lubis²⁾, Retno Wahyudi¹⁾

¹⁾Program Studi Mekanisasi Pertanian, Politeknik Negeri Lampung
Jl. Soekarno Hatta No.10, Rajabasa Raya, Lampung 35141, Indonesia

²⁾Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145, Indonesia

*email corresponding: alex.pandia@polinela.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Diperbaiki:
Revised
15/03/2024

Diterima:
Accepted
15/07/2024

Publikasi Online:
Online-Published
31/10/2024

ABSTRAK

Pada proses perancangan sistem poros rotor terdapat hal-hal yang perlu diperhatikan, untuk menghasilkan sistem poros rotor yang baik ketika mulai dioperasikan. Kegagalan yang terjadi pada sistem poros rotor secara umum disebabkan oleh getaran yang berlebihan pada sistem. Hal ini dapat dihindari dengan mendeteksi lebih awal frekuensi pribadi sistemnya, dengan memprediksi frekuensi pribadinya maka dapat juga memprediksi kecepatan putaran kritisnya. Kecepatan putaran kritis sistem dapat diketahui dengan menyelesaikan persamaan geraknya dengan beberapa metode, pada penelitian ini penyelesaian persamaan gerak sistem didapatkan dengan metode elemen hingga, dimana persamaan matriks lokal ditentukan sesuai dengan persamaan kemudian didapatkan persamaan gerak matriks global dan diselesaikan dengan metode langsung (direct method) dengan menggunakan nilai eigen dan eigen vector sistem. Sebuah program dirancang untuk dapat memprediksi kecepatan putaran kritis sistem. Program yang dirancang dituliskan dalam bahasa pemrograman MATLAB. Hasil program yang disusun jika dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium mendapatkan selisih 1,23%-3,69%.

Kata Kunci : sistem poros rotor bertingkat, metode elemen hingga, metode langsung, kecepatan putaran kritis.

ABSTRACT

In the process of designing a rotor shaft system, there are aspects that need to be considered to produce a well-functioning rotor shaft system when it starts operating. Failures that occur in rotor shaft systems are generally caused by excessive vibrations in the system. This can be avoided by detecting the system's natural frequencies early on, as predicting its natural frequencies can also predict its critical rotational speeds. The critical rotational speeds of the system can be determined by solving its equations of motion using various methods. In this study, the equations of motion of the system were solved using the finite element method, where local matrix equations were determined according to the equations and then global matrix equations were obtained and solved using a direct method, employing the eigenvalues and eigenvectors of the system. A program was designed to predict the critical rotational speeds of the system. The program was implemented using the MATLAB programming language. The results of the program, when compared with laboratory test results, showed a difference of 1.23%-3.69%.

©2024 The Authors. Published by
AUSTENIT (Indexed in SINTA)

doi:
[10.53893/austenit.v16i2.8513](https://doi.org/10.53893/austenit.v16i2.8513)

Keywords : co-axial dual rotor system, finite element method, direct method, critical speeds.

1 PENDAHULUAN

Dalam perkembangan mesin-mesin rotasi dalam rekayasa modern dibutuhkan mesin-mesin yang mampu beroperasi pada kecepatan putaran yang tinggi (*high speed*), mampu mentransmisikan daya yang besar (*high power*) dan memiliki bobot yang cenderung ringan (*lower weight*). Pada proses perancangan sistem poros rotor terdapat hal-hal yang perlu diperhatikan, untuk menghasilkan sistem poros rotor yang baik ketika mulai dioperasikan. Kegagalan yang terjadi pada sistem poros rotor secara umum disebabkan oleh getaran yang berlebihan pada sistem. Hal ini dapat dihindari dengan mendeteksi lebih awal frekuensi pribadi sistemnya, dengan memprediksi frekuensi pribadinya maka dapat juga memprediksi kecepatan putaran kritisnya. Kecepatan putaran kritis merupakan daerah operasi yang memerlukan perhatian khusus, karena jika sistem beroperasi dekat bahkan sama dengan kecepatan putaran kritisnya akan menimbulkan ketidakstabilan sistem karena terjadinya getaran yang hebat. Efek vibrasi atau getaran yang berlebihan akan menyebabkan kendala pada sistem dan menurunkan kinerja sistem yang ada (Irawan, 2021).

Aplikasi metode modal testing klasik terus berkembang sehingga dapat mengidentifikasi parameter-parameter modal berbagai struktur (Budiwantoro, 2001). Metode elemen hingga merupakan metode yang populer digunakan untuk menentukan frekuensi pribadi dengan memodelkan sistem poros rotor yang ada. Metode elemen hingga telah diterapkan untuk menentukan frekuensi pribadi dan modus getar dengan posisi piringan (*disk*) yang terletak pada bagian tengah poros tanpa tumpuan (Mubarak, 2012). Kecepatan putaran kritis, perpindahan *transient* dan diagram *trajectory* dapat diprediksi juga menggunakan metode elemen hingga (Fei, 2013). Dengan menggunakan metode elemen hingga (Yanto, 2014) melakukan analisis terhadap perilaku dinamik sistem poros rotor 3D (1 tingkat), didapatkan hasil variasi putaran kritis sebanyak 192 frekuensi. Pola getar (*mode shape*) yang dihasilkan terdapat 96 searah dengan putaran (*forward*), dan 96 arah berlawanan dengan arah putaran mundur.

Dalam studi kasus yang dilakukan oleh (Hutahean, 2014), metode substruktur digunakan untuk menganalisa karakteristik dinamik perilaku dinamik sistem rotor (turbin 1 tingkat). Metode tersebut dapat digunakan, untuk mendapatkan kecepatan putaran kritis poros yang diplot dalam diagram *campbell* (diagram yang digunakan untuk melihat kecepatan putaran kritis poros). Dalam penelitian tersebut terdapat tingkat kesalahan absolut kurang dari 5%. *Software* yang berlisensi seperti ANSYS dapat digunakan untuk menentukan arah *whirling* orbit dan dengan memperhitungkan *gyroscopic effect* (Jahromi, 2015). Penggunaan

efek *unbalance* dapat dilakukan juga untuk menganalisa respon dinamis rotor 1 tingkat, dimana rotor terpasang pada poros yang fleksibel dan ditumpu 2 buah *rigid bearing* (Mahartana, 2017). Dengan menggabungkan metode elemen hingga dan metode pseudo modal juga bisa dilakukan untuk memprediksi kecepatan putaran kritis poros dan respon massa tak imbangnya (Zulhendri, 2018).

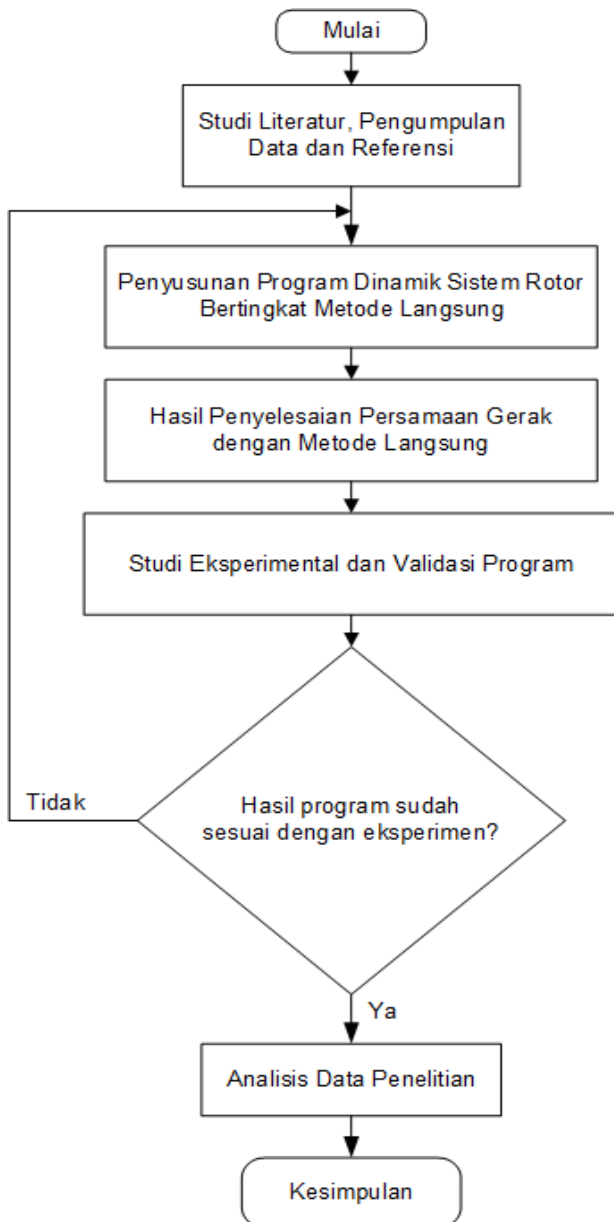
Prediksi kecepatan putaran kritis poros bisa dilakukan dengan perhitungan manual secara teoritis dan membutuhkan waktu yang lama untuk mendapatkan hasilnya. Dengan perkembangan teknologi yang masif, maka melalui penelitian ini disusun program yang dapat memprediksi kecepatan putaran kritis poros rotor bertingkat. Terdapat beberapa *software* yang digunakan untuk memprediksi kecepatan putaran kritis dinamik sistem poros rotor, seperti ANSYS, MATLAB, Solidwork yang membutuhkan lisensi resmi yang tentunya berbayar. Penulis tertarik untuk menyusun program yang sudah diuji. Metode elemen hingga juga diterapkan untuk menginvestigasi tegangan pada poros bertingkat dengan basis *computer aided engineering*, dengan menggunakan program *Solid Works 2021* (Chandra, 2021) dan juga dapat diterapkan pada proses-proses permesinan untuk menganalisis vibrasi *frame cnc router* 3 sumbu (Prasetyo, 2020). Pengujian program dilakukan untuk memeriksa dan memastikan bahwa program apakah program yang ada telah berjalan dengan semestinya (Ningrum, 2019).

Pada penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya, penulis menemukan bahwa model yang dianalisis sebatas sistem poros rotor dengan sistem *single rotor*. Sedangkan belum banyak yang melakukan penelitian untuk sistem poros rotor bertingkat, mengingat penggunaan sistem poros rotor bertingkat banyak ditemukan dalam bidang penerbangan (helikopter), industri, turbin dan lainnya. Metode penyelesaian persamaan gerak yang dilakukan oleh (Zulhendri, 2018) menggunakan metode *pseudo modal* dan didapatkan hasil perbedaan dengan referensi sebesar 0,12%-6,6%, tetapi belum dilakukan validasi secara eksperimental. Melalui penelitian ini diharapkan dengan menggunakan metode langsung (*direct method*) dapat menghasilkan program dengan nilai persentase galat yang lebih kecil dan yang sudah divalidasi sehingga dapat memprediksi kecepatan putaran kritis poros rotor bertingkat dalam kondisi nyata di lapangan.

2. BAHAN DAN METODA

Metode penelitian yang digunakan dimulai dengan studi literatur, pengumpulan data dan referensi. Setelah itu dilakukan penyusunan program untuk memprediksi kecepatan putaran

kritis rotor dengan metode elemen hingga untuk mendapatkan persamaan geraknya, dan persamaannya diselesaikan dengan metode langsung (*direct method*) dengan bahasa program MATLAB. Langkah selanjutnya adalah melakukan percobaan secara eksperimental pada mesin uji. Gambar 1 merupakan diagram alir pada penelitian ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Pada tahap awal penelitian ini dimulai dengan studi literatur, pengumpulan data dan referensi. Langkah berikutnya adalah penyusunan program dinamik untuk menyelesaikan persamaan sistem gerak poros rotor bertingkat sesuai dengan persamaan yang didapat dari referensi yang ada. Penyusunan program dilakukan dengan bantuan *software Matlab*. Setelah program didapatkan dilakukan validasi program dengan

membandingkan program yang sudah disusun dengan penelitian yang dilakukan oleh (Miao, 2014). Setelah dilakukan validasi dan mendapat hasil yang baik maka dilanjutkan dengan memvalidasi program dengan cara eksperimental. Membuat benda uji yang disesuaikan dengan mesin uji poros. Kemudian seluruh dimensi yang terdapat pada sistem poros rotor bertingkat dimasukkan ke dalam program, untuk mendapatkan putaran kritis secara teoritis, kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimental dengan mesin uji poros. Kemudian hasil secara teoritis dan eksperimental dibandingkan dan diharapkan mendapatkan nilai yang relatif sama.

Persamaan gerak sistem poros rotor secara umum sebagai berikut: (Lalane, 1997)

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F(t) \quad (1)$$

Dengan menyelesaikan persamaan (1) dapat diperoleh frekuensi pribadi (*natural frekuensi*) sebagai fungsi dari kecepatan putaran rotor, sedangkan persamaan gerak sistem poros rotor bertingkat dapat dilihat pada persamaan (2)

$$M\ddot{\delta} + C(\Omega_1, \Omega_2)\dot{\delta} + K\delta = F(t) \quad (2)$$

Ketiga matriks M , C , dan K diperoleh dengan cara Menyusun Matriks $M_1, M_2, C_1(\Omega_1), C_2(\Omega_2), C$ dan K yang merupakan matriks pada *bearings* dan *seals*.

Dengan menggunakan metode langsung (*direct method*), maka persamaan (2) dapat diselesaikan dengan memberikan asumsi jawab, yang dapat dilihat pada persamaan (3), kemudian disubstitusikan ke dalam persamaan (2), sehingga diperoleh persamaan (4)

$$\delta = \Delta e^{rt} \quad (3)$$

$$(r^2M + rC + K)\Delta = 0 \quad (4)$$

Persamaan (4) dapat ditulis dalam bentuk *state space*.

$$\begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r\Delta \\ r \end{Bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & -K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} r\Delta \\ r \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Penyelesaian persamaan (5) dapat diperoleh dari nilai *eigenvalue* dan *eigenvector* dalam besaran kompleks. Sebagai contoh, dalam persamaan (6) dijelaskan nilai dua *eigenvalue* pertama.

$$r_1 = \frac{\alpha_1 \omega_1}{\sqrt{1-\alpha^2}} \pm j\omega_i \quad (6)$$

Nilai *eigenvector* yang bersesuaian dapat dilihat dalam persamaan berikut. Sehingga melalui penyelesaian persamaan yang ada didapatkan

frekuensi pribadi (kecepatan kritis poros rotor) yang diplot dalam diagram *Campbell*.

$$\Delta_1 = R_1 \pm jL_1 \tag{7}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi numerik dilakukan dalam proses penyusunan program untuk menyelesaikan persamaan gerak sistem poros rotor bertingkat, dan setelah program didapatkan dilanjutkan dengan melakukan validasi program yang ada dengan studi eksperimental.

3.1 Penyusunan Program

Seluruh proses penulisan program menggunakan Bahasa pemrograman MATLAB. Metode langsung (*direct method*) digunakan untuk menyelesaikan persamaan gerak sistem poros rotor yang bertingkat yang dapat dilihat pada persamaan (2).

```

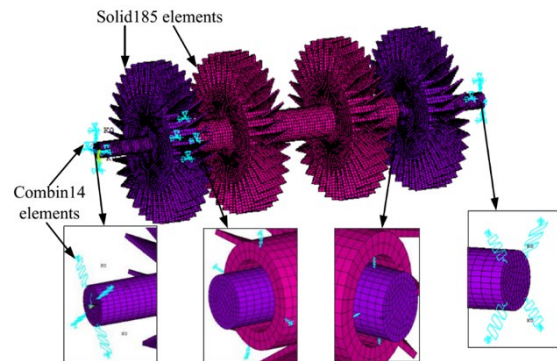
for N=nstart:scale:nstop
    No_x=No_x+1;
    x_axis(No_x)=N;
    N1(No_x)=N/60;
    N2(No_x)=1.5*N/60;
    Omega=N*pi/30; %putaran dalam rad/s
    Omega2=1.5*Omega;
    C_Omega=Omega*C+Cseals;
    C_Omega1=Omega*C1+Cseals1;
    C_Omega2=Omega2*C1+Cseals1;
    A=[zeros(NMAX) M
        M C_Omega];
    [V,D]=eig(A,B);
    for k=1:2*NMAX
        diag_D(k)=D(k,k);
    end
    clear D
    dum=zeros(2*NMAX,2);
    dum(:,1)=(1./diag_D)/(2*pi).';
    for k=1:2*NMAX
        dum(k,2)=k;
    end
    dum1=sortrows(dum,1);
    clear dum
    Fn_dum=abs(imag(1./diag_D)/(2*pi));
    for k=1:NMAX
        k1=2*k-1;
        No_urut(k)=dum1(k1,2);
    end
    for k=1:NoM
        Fn_dum1(k)=Fn_dum(No_urut(k));
    end
    Fn(:,No_x)=Fn_dum1.';
    %steady state response
end
    
```

Gambar 2. Potongan Kode Program Penyelesaian Persamaan Gerak Sistem Poros Rotor Bertingkat

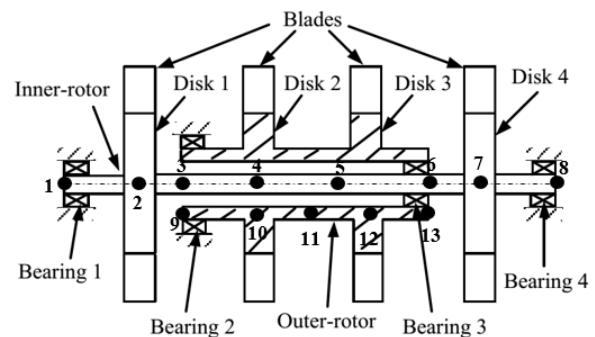
Pada Gambar dapat dilihat cuplikan kode pemrograman untuk penyelesaian persamaan sistem gerak poros rotor bertingkat. Kode program ini didapatkan berdasarkan penulisan rumus-rumus pada persamaan (1) sampai dengan persamaan (6), yang disusun dalam bentuk Bahasa pemrograman.

3.2 Validasi Program

Setelah program selesai disusun, selanjutnya dilakukan proses validasi program dengan membandingkan pengujian yang dilakukan oleh (Miao, 2014) menggunakan *software Ansys*. Pemodelan sistem poros *dual rotor* secara 3D yang dilakukan oleh Miao, dapat dilihat pada Gambar 3, dan pada Gambar 4 merupakan pemodelan dengan 1D yang dilakukan oleh penulis. Setelah mendapatkan model 3D, dilakukan penyederhanaan menjadi 1D agar data-datanya dapat dimasukkan ke dalam program yang sudah disusun, dapat dilihat pada Gambar , melalui model 1D juga sudah ditentukan panjang elemen setiap elemen, data poros luar dan dalam, data piringan, dan data *bearing* dan *seals*.



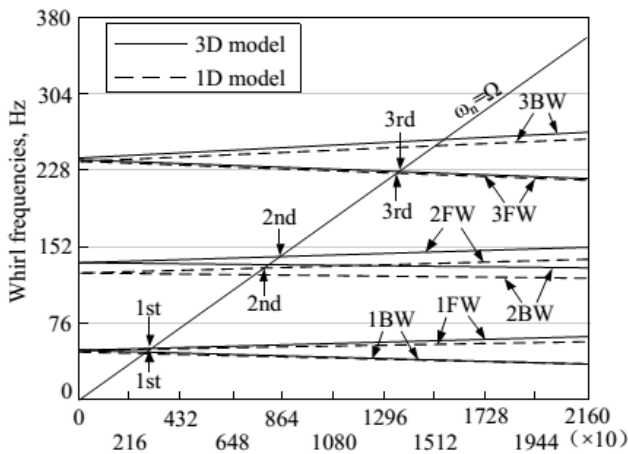
Gambar 3. Pemodelan sistem poros rotor 3D. (Miao, 2014)



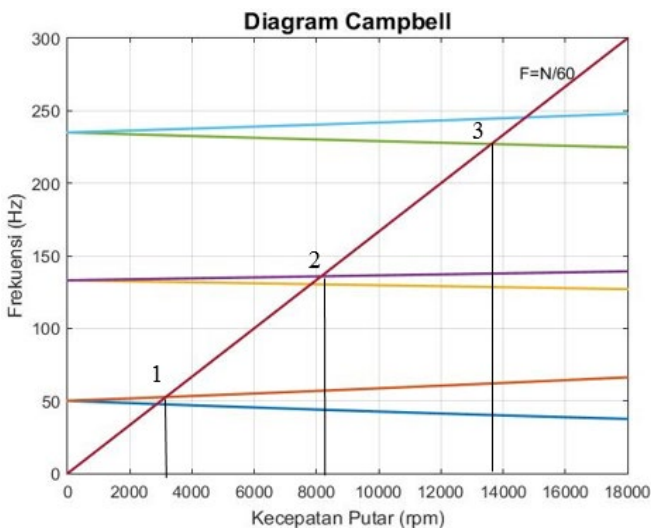
Gambar 4. Pemodelan sistem poros rotor 1D.

Hasil plot diagram *Campbell* yang dilakukan oleh (Miao, 2014) dengan bantuan *software Ansys* dapat dilihat pada Gambar 5 , sedangkan hasil plot diagram *Cambell* yang didapatkan melalui program yang sudah disusun dapat dilihat pada Gambar 6.

Sistem *dual rotor* (Miao, 2014) dibagi menjadi 11 elemen hingga dengan 7 elemen hingga pada poros dalam dan 4 elemen hingga pada poros luar. Pada nodal ke 1, 8, dan 9 terdapat bantalan dan *seals*, sedangkan pada nodal ke 6 dan 13 merupakan terdapat *intershaft bearing* yang menghubungkan sistem poros luar dan sistem poros dalam. Seluruh data yang dimasukkan ke dalam program, sesuai dengan data sistem yang diteliti oleh (Miao, 2014).



Gambar 5. Diagram Campbell Referensi. (Miao, 2014)



Gambar 6 . Diagram Campbell hasil penyusunan program

Pada Tabel 1 merupakan hasil perbandingan data frekuensi pribadi (kecepatan putaran kritis sistem) yang didapatkan oleh (Miao, 2014) dan melalui penyusunan program pada penelitian ini.

Dapat diperhatikan pada Tabel 1. di atas bahwa persentase perbedaan frekuensi pribadi pertama sekitar 0,595% sampai 3,259% pada model 3 dimensi, 0,359% sampai 6,470% pada model 1 dimensi. Hal ini menunjukkan bahwa program komputasi yang sudah disusun pada tugas

akhir ini sudah bisa diterapkan dalam berbagai kasus sistem poros rotor. Perbandingan hasil kecepatan putaran kritis antara referensi dan data yang diperoleh melalui perhitungan komputasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Perbandingan data frekuensi pribadi referensi (3D dan 1D oleh Miao, 2014) dan perhitungan komputasi.

Model 3D (Hz)	Model 1D (Hz)	Perhitungan Komputasi (Hz)	Persentase Perbedaan (%)	
			3D	1D
50,315	48,145	50,015	0,595	3,886
50,348	48,145	50,015	0,660	3,886
137,25	124,98	133,066	3,048	6,470
137,55	124,98	133,066	3,259	6,470
240,75	235,94	235,039	2,372	0,382
242,02	235,94	235,039	2,862	0,359

Tabel 2. Perbandingan data kecepatan putaran kritis referensi dan perhitungan komputasi.

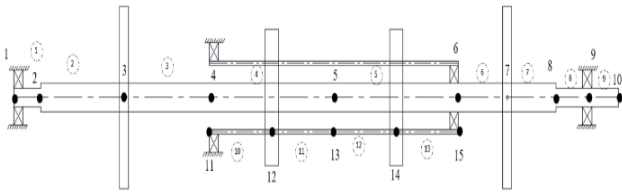
No	Model 3D (rpm)	Model 1D (rpm)	Perhitungan Komputasi (rpm)	Persentase Perbedaan (%)	
				3D	1D
1	3.129	2.988	3.155	0,83	5,58
2	8.534	7.738	8.151	4,48	5,53
3	13.712	13.479	13.625	0,63	1,08

Pada Tabel 2. di atas hasil persentase perbedaan kecepatan putaran kritis hasil referensi dan hasil perhitungan komputasi tidak terlalu besar, dapat dikatakan bahwa hasilnya mendekati akurat. Persentase perbedaan hasil perhitungan komputasi dan referensi model 3 dimensi (3D) sebesar 0,831% sampai 4,488%, terhadap model 1 dimensi sebesar 1,083% sampai 5,589%. Perbedaan persentase hasil perbandingan dari data yang diperoleh disebabkan karena pemodelan elemen hingga yang berbeda dan metode penyelesaian yang digunakan.

3.3 Implementasi Program Sistem Poros Rotor

Setelah dilakukan penyusunan program, maka dilanjutkan dengan implementasi program yang ada. Pada Gambar 5 merupakan desain poros rotor dalam bentuk 2D yang sudah dibagi menjadi 13 elemen, di mana elemen 1 sampai dengan elemen 9 untuk poros bagian dalam dan elemen 10 sampai dengan elemen 13 untuk poros bagian luar. Pada tabel 3 sampai dengan tabel 5 merupakan panjang untuk setiap elemen pada sistem poros rotor bertingkat yang diuji. Pada Gambar 5 juga menjelaskan posisi *bearings* dan *seals* pada nodal ke 1,9, 11, 6 dan 15. Sedangkan untuk rotor terdapat pada nodal 3, 7, 12 dan 14 yang ditandai dengan titik tebal hitam pada Gambar 5. Pada Tabel 6. sampai Tabel 8. merupakan data dimensi poros,

piringan, dan karakteristik bantalan sistem *dual rotor*.



Gambar 5. Pembagian Elemen Hingga Sistem Poros Rotor Bertingkat

Pada Gambar 5, terdapat 9 elemen (nomor 1-9) dan 10 nodal (1-10) untuk poros bagian dalam, dengan panjang masing-masing elemen dapat dilihat pada Tabel 3. Sedangkan pada poros bagian luar terdapat 4 elemen (10-13), dan 5 nodal (11-15). Jika dijumlahkan, total elemen pada sistem poros co-axial dual rotor ini berjumlah 14 elemen dengan 15 nodal.

Tabel 3. Panjang elemen sistem poros bagian dalam.

Elemen	1	2	3	4	5
Panjang Elemen (mm)	30	94	96	14	14
Elemen	6	7	8	9	
Panjang Elemen (mm)	55	55	35	35	

Tabel 4. Panjang elemen sistem poros dalam.

Elemen	10	11	12	13
Panjang Elemen (mm)	70	70	70	70

Tabel 5. Dimensi penampang poros sistem *dual rotor*.

Poros	Jari-Jari Dalam (cm)	Jari-Jari Luar (cm)
Poros dalam (1)	0,0	1,524
Poros luar (2)	2,54	3,048

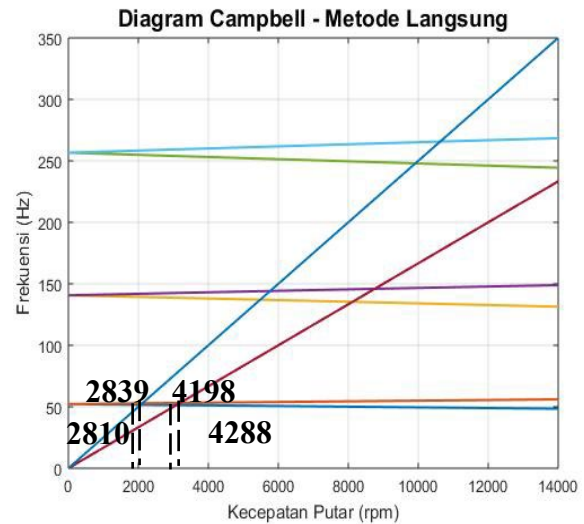
Tabel 6. Data *disk* sistem *dual rotor*.

Disk	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
<i>M</i> (kg)	10,51	7,01	3,5	7,01
<i>I_{Dx}</i> 10 ⁻² (kgm ²)	4,295	2,145	1,355	3,39
<i>I_{Dy}</i> 10 ⁻² (kgm ²)	8,59	4,29	2,71	6,78

Tabel 7. Karakteristik bantalan sistem *dual rotor*.

Bantalan	1	2	3	4
$k_{xx} = k_{zz}$, (N/m) [$\times 10^7$]	2,63	1,75	0,875	1,75

Setelah seluruh data-data yang dibutuhkan sudah didapatkan, maka dilanjutkan dengan memasukkan data-data tersebut ke dalam program kemudian menjalankan program. Sehingga didapatkan hasil simulasi prediksi kecepatan sistem poros rotor bertingkat secara teoritis yang dapat dilihat pada Gambar 6, dan pada Tabel 8 merupakan data 4 kecepatan pertama putaran kritis yang ditampilkan dalam bentuk tabel. Kecepatan kritis ditandai dengan perpotongan antara garis frekuensi dan garis putaran harmonik.



Gambar 6. Hasil simulasi prediksi kecepatan putaran poros.

Tabel 8. Hasil prediksi 4 kecepatan pertama putaran sistem.

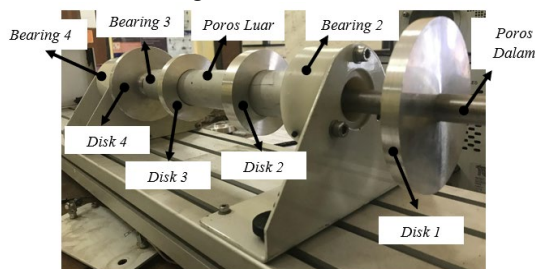
No	Kecepatan Kritis (Metode Langsung)
1	2.810 rpm
2	2.839 rpm
3	4.198 rpm
4	4.288 rpm

Diagram *Campbell* didapatkan dengan cara memasukkan semua parameter-parameter pengujian yang terdapat pada Tabel 3 sampai dengan Tabel 7. Setelah semua parameter dimasukkan ke dalam program yang sudah disusun, maka program akan menyelesaikan persamaan gerak yang terbentuk pada sistem poros rotor bertingkat (Persamaan 1 sampai dengan Persamaan 7). Kemudian hasil penyelesaian persamaan gerak tersebut di plot dalam diagram *Campbell*, dengan sumbu *x* adalah kecepatan putar (*rpm*) dan sumbu *y* adalah frekuensi (*Hz*). Melalui diagram *Campbell* putaran kritis ditandai dengan

perpotongan antara garis frekuensi dan garis putaran harmonik yang dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 8.

3.4 Studi Eksperimental

Setelah penyusunan program sistem poros rotor selesai dilakukan, maka perlu divalidasi dengan percobaan secara nyata di dalam Laboratorium Fenomena Dasar Mesin Universitas Lampung. Eksperimen dilakukan di mesin uji poros, dan rangkaian sistem poros rotor difabrikasi dengan dimensi yang sudah ditentukan. Pada Gambar 7 merupakan desain sistem poros rotor bertingkat, yang sudah dipasangkan pada alat uji. Pada tabel 3 sampai dengan tabel 9 merupakan dimensi sistem poros rotor bertingkat.



Gambar 7. Sistem poros rotor bertingkat.



Gambar 8. Rangkaian Alat Uji Poros.

Prosedur pengujian menggunakan alat uji poros yaitu dengan menaikkan kecepatan putar dengan perlahan yang terdapat pada *control and instrumentation unit*. Kecepatan putaran dinaikkan sampai menyebabkan sistem bergetar dengan tidak stabil, pada saat inilah terjadi kecepatan putaran kritis sistem. Pada pengujian yang dilakukan, didapatkan kecepatan putaran kritis sistem yang dijelaskan pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil pengujian kecepatan putaran kritis studi eksperimental.

No.	Kecepatan Kritis (Studi Eksperimental)
1	2.845 rpm
2	2.904 rpm
3	4.357 rpm
4	4.368 rpm

3.5 Perbandingan Simulasi dan Eksperimen

Setelah dilakukan penyusunan program, pengujian program dan pengujian secara eksperimental didapatkan hasil seperti pada Tabel . Maka pada Tabel 10 dapat dilihat hasil perbandingan antara prediksi dengan program yang sudah disusun dan eksperimen secara real yang diuji di Laboratorium.

Pada Tabel 10, dapat dilihat bahwa nilai prediksi kecepatan putaran porosnya sudah mendekati kondisi nyatanya. Perbedaan antara hasil prediksi dan real berada di antara rentang 1,23% sampai dengan 3,69%. Melalui hasil prediksi kecepatan putaran kritis ini kita dapat mengetahui daerah-daerah yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem pada kecepatan-kecepatan yang terdapat pada Tabel 10. Sehingga daerah operasi sistem yang dirancang tidak dianjurkan untuk dioperasikan pada rentang kecepatan tersebut.

Tabel 10. Hasil pengujian kecepatan putaran kritis studi eksperimental.

NO	Kecepatan Kritis (Eksperimen)	Kecepatan Kritis (Metode Langsung)	Persentase Perbedaan
1	2.845 rpm	2.810 rpm	1,23 %
2	2.904 rpm	2.839 rpm	2,23 %
3	4.357 rpm	4.198 rpm	3,69 %
4	4.368 rpm	4.288 rpm	1,83 %

4. KESIMPULAN

Persentase nilai perbedaan eksperimen dan kondisi real sebesar 1,23% sampai 3,69%, dimana ini mengindikasikan bahwa program yang sudah disusun dapat digunakan untuk memprediksi kecepatan putaran kritis poros rotor bertingkat. Dengan menggabungkan metode elemen hingga dan metode langsung untuk menyelesaikan persamaan gerak sistem poros rotor bertingkat yang cukup efektif. Bahasa pemrograman MATLAB dapat digunakan untuk membantu penulisan program dengan hasil yang efektif. Pengembangan program selanjutnya dapat dilakukan agar dapat digunakan dalam skala yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Agung Irawan, Irawan Malik, & ,Mardiana, M. (2021). Analisis Vibrasi Frame Mesin Cnc Plasma Cutting Secara Eksperimen. *Machinery: Jurnal Teknologi Terapan*, 2(3), 147–151. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6383878>
- Budiwanto, B., (2001), Studi Perbandingan Metode Modal Testing Klasik dan Modal Testing Kompleks Dengan Metode Analitik Dalam Identifikasi Arah Whirling Orbit Sistem Rotor. *Jurnal Teknik Mesin Vol. XVI, No. 2*, p. 32-42, Institut Teknologi Bandung, Bandung. <https://journals.itb.ac.id/index.php/jtms/article/view/4875>
- Chandra, H., Putra, D. P., & Romli, R. (2021). Investigation Of Stress On Multi-Level Shaft Using Finite Element Method Based On Computer-Aided Engineering. *Austenit*, 13(1), 23–27. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4747728>
- Mubarak, A. Z., Munirwan, R. P., & Razali, A. (2014). Kaji Eksperimental Getaran Roda Gila pada Sepeda Statis. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(1), 25-28. <https://jurnal.usk.ac.id/JTM/article/download/4826/4161>
- F. C. Ningrum, D. Suherman, S. Aryanti, H. A. Prasetya and A. Saifudin, "Pengujian Black Box pada Aplikasi Sistem Seleksi Sales Terbaik Pengujian Black Box pada Aplikasi Sistem Seleksi Sales Terbaik," *Jurnal Informatika Universitas Pamulang*, vol. 4, no. 4, pp. 125-130, 2019. <https://prosiding.respati.ac.id/index.php/PSN/article/download/290/282>
- Fei, Z. X., Tong, S. G., & Wei, C., (2013), Investigation of the Dynamic Characteristic of Dual Rotor System and Its Start-Up Simulation Based on Finite Element Method. *Journal of Zhejiang University Science A 2013 Vol. 14 No. 4 P 268-280*, Zhejiang University Pres., Huangzhou. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1200298>
- Hutahean, R., (2014), Penerapan Metode Substruktur Dalam Analisis Dinamika Rotor. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cylinder*, Vol 1, No. 1 P. 41-48, Apr. 2014, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Yogyakarta. <https://ejournal.atmajaya.ac.id/index.php/cylinder/article/view/4280>
- Jahromi, A. F., (2015), Forward and Backward Whirling of a Rotor with Gyroscopic Effect. *Vibration Engineering and Technology of Machinery, Mechanism and Machine Science 23: 879-887*, Springer International Publishing, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09918-7_78
- Lalanne, M., dan Ferraris, G., (1997), *Rotordynamics Prediction in Engineering Second Edition*. Wiley, New Jersey.
- Mahartana, Ida Bagus P. P., dan Guntur, H.L., (2017), Pemodelan dan Analisis Pengaruh Kenaikan Putaran Kerja Terhadap Respon Dinamis, Kasus Unbalance Rotor Steam Turbine Unit 1 PLTU Amurang 2x25 MW. *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 6 No. 1 P: 114-119, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya. <https://dx.doi.org/10.12962/j23373539.v6i1.21794>
- Miao, H., Zang, C., and Friswell, M., 2014, Model Updating and Validation of a Dual-Rotor System. *Proceedings of ISMA Including USD2014*, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China. http://michael.friswell.com/PDF_Files/C374.pdf
- Prasetyo, A., Malik, I., & Azharuddin, A. (2020). Analisis Vibrasi Frame Cnc Router 3 Sumbu Secara Numerik. *Austenit*, 12(1), 28–33. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4547828>
- Yanto, Asmara., & Hidayat, Rahma. (2014). Analisis Perilaku Dinamik Sistem Poros-Rotor 3d. *Jurnal Teknik Mesin*, 4(2), 75–83. <https://doi.org/10.21063/jtm.2014.v4.i2.75-83>
- Zulhendri, H., Sembiring, A., Lubis, A., (2018), Analytical and Numerical Studies of Dynamic Finite Element Analysis of Coaxial Dual Rotor System with Pseudo Modal Method Using Matlab. *Prosiding SNTTM XVII*, hal. 029-038, Universitas Nusa Cendana, Kupang. http://repository.lppm.unila.ac.id/9865/3/Makalah%20SNTTM%202018_Zulhendri.pdf