



ANALISIS *CRITICAL SPEED* PADA POROS AKIBAT *CRACK* MENGGUNAKAN METODE TEORITIS DAN METODE FEA (*FINITE ELEMENT ANALYSIS*)

Ali¹ dan Supriatna Wijaya^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Bandung

E-mail : supriatna.wijaya123@gmail.com

Masuk : 5 September 2025

Direvisi : 21 September 2025

Disetujui : 4 Oktober 2025

Abstrak: Poros merupakan komponen penting dalam sistem transmisi daya yang berputar dengan kecepatan tinggi dan mengalami beban berulang. Retakan pada poros mengurangi kekakuan, menurunkan frekuensi alami, dan menurunkan kecepatan kritis, yang meningkatkan risiko resonansi dan kegagalan dini. Studi ini menganalisis pengaruh variasi diameter poros (20 mm, 25 mm, 30 mm) dan kedalaman retak (2 mm, 4 mm, 6 mm) terhadap kecepatan kritis. Metode ini menggabungkan perhitungan teoretis menggunakan persamaan Euler–Bernoulli dengan Analisis Elemen Hingga (FEA) melalui Solidworks dan Ansys. Hasil menunjukkan bahwa retakan yang lebih dalam secara signifikan menurunkan kecepatan kritis. Misalnya, poros 20 mm tanpa retak memiliki kecepatan kritis mode 1 sebesar 5.638 rpm, yang turun menjadi 4.900 rpm dengan retakan 6 mm. Sebaliknya, poros 30 mm tanpa retak mencapai 8.458 rpm, menunjukkan resistansi yang lebih tinggi terhadap pengurangan frekuensi. Hasil teoretis dan simulasi menunjukkan tren yang serupa, yang menyoroti pentingnya deteksi retakan dini untuk memastikan operasi yang aman.

Kata kunci: Poros, Retak, Frekuensi Alami, FEA.

Abstract: Shafts are essential components in power transmission systems that rotate at high speeds and are subjected to repetitive loads. Cracks in shafts reduce stiffness, lower natural frequency, and decrease critical speed, which increases the risk of resonance and premature failure. This study analyzes the influence of shaft diameter variations (20 mm, 25 mm, 30 mm) and crack depths (2 mm, 4 mm, 6 mm) on critical speed. The method combines theoretical calculations using the Euler–Bernoulli equation with Finite Element Analysis (FEA) through Solidworks and Ansys. Results indicate that deeper cracks significantly lower critical speed. For instance, a 20 mm shaft without a crack has a mode 1 critical speed of 5,638 rpm, which drops to 4,900 rpm with a 6 mm crack. Conversely, a 30 mm shaft without crack reaches 8,458 rpm, showing higher resistance to frequency reduction. Theoretical and simulation results show similar trends, highlighting the importance of early crack detection to ensure safe operation.

Keywords: Shaft, Crack, Natural Frequency, FEA.

PENDAHULUAN

Dalam dunia rekayasa mekanikal, poros merupakan komponen penting yang berfungsi sebagai penghubung antara berbagai elemen mesin, seperti motor, roda gigi, dan beban lainnya. Poros beroperasi dalam kondisi rotasi yang sering kali melibatkan kecepatan tinggi dan beban dinamis. Salah satu fenomena yang sangat penting dalam analisis poros adalah *critical speed* atau kecepatan kritis, yaitu ketika frekuensi pada gaya eksitasi sama dengan frekuensi alami yang menyebabkan resonansi pada poros [1], [2].

Pada kondisi ini, getaran yang dihasilkan oleh poros dapat meningkat secara signifikan sehingga berpotensi menyebabkan kerusakan struktural yang fatal. Ketika poros mengalami retak (*crack*), kekuatan struktur poros dapat menurun secara signifikan. *Crack* pada poros dapat terjadi akibat berbagai faktor, seperti kelelahan material, beban berlebih, atau cacat produksi. *Crack* tidak hanya mengubah distribusi massa dan kekakuan poros, melainkan dapat mempengaruhi frekuensi alami yang menyebabkan menurunnya nilai putaran kritis pada poros tersebut, sehingga meningkatkan risiko resonansi pada kecepatan operasional yang lebih rendah dari yang diharapkan [3]–[5].

Beberapa penelitian sebelumnya telah meninjau pengaruh retakan pada poros berputar, tetapi masing-masing memiliki keterbatasan pada konfigurasi dan parameter yang diteliti. Flaich et al. (2020) [6] hanya menganalisis satu jenis diameter poros dan satu kedalaman retakan, dengan posisi retakan yang tidak berada di tengah poros, sehingga belum merepresentasikan pengaruh variasi diameter maupun kedalaman retakan. Penelitian Kekan dan Kumar (2019) [7] dilakukan sepenuhnya secara eksperimental dengan beberapa retakan yang ditempatkan di salah satu ujung tumpuan, bukan di tengah poros, sehingga hasilnya belum menggambarkan perilaku poros dengan satu retakan tunggal pada posisi kritis di tengah-tengah antara tumpuan. Sementara itu, Kumawat et al. (2020) [8] meneliti poros bertingkat dengan variasi jarak retakan dari pusat, menggunakan FEA Ansys saja, sehingga tidak mencakup analisis poros diameter tunggal maupun perbandingan dengan metode teoritis [6]–[8].

Berdasarkan tinjauan tersebut, terlihat bahwa belum ada penelitian yang secara spesifik mengkaji perubahan putaran kritis pada poros dengan satu retakan melintang yang terletak tepat di tengah-tengah tumpuan, menggunakan tiga variasi diameter dan tiga tingkat kedalaman retakan, serta dibandingkan antara metode teoritis dan FEA (Ansys dan Solidworks). Dengan demikian, penelitian ini mengisi kekosongan tersebut dengan menganalisis pengaruh diameter dan besarnya *crack* terhadap frekuensi alami dan putaran kritis poros secara lebih komprehensif.

Analisis ini sangat penting, terutama dalam aplikasi industri di mana kegagalan poros dapat mengakibatkan kegagalan teknis dan kerugian ekonomi yang signifikan, serta risiko keselamatan bagi operator dan lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam tentang bagaimana *crack* mempengaruhi *critical speed* pada poros menjadi krusial dalam perancangan dan pemeliharaan sistem mekanikal. Dengan melakukan analisis yang tepat, engineer dapat merancang strategi mitigasi yang efektif, seperti pemilihan material yang lebih baik, perawatan preventif, dan pengembangan sistem monitoring untuk mendeteksi *crack* sebelum menyebabkan kegagalan yang lebih besar [9], [10].

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis *critical speed* pada poros tanpa *crack* dan poros dengan *crack* menggunakan metode teoritis dan metode FEA untuk mengetahui perubahan nilai *critical speed* pada poros tersebut yang mengalami retakan atau *crack*.

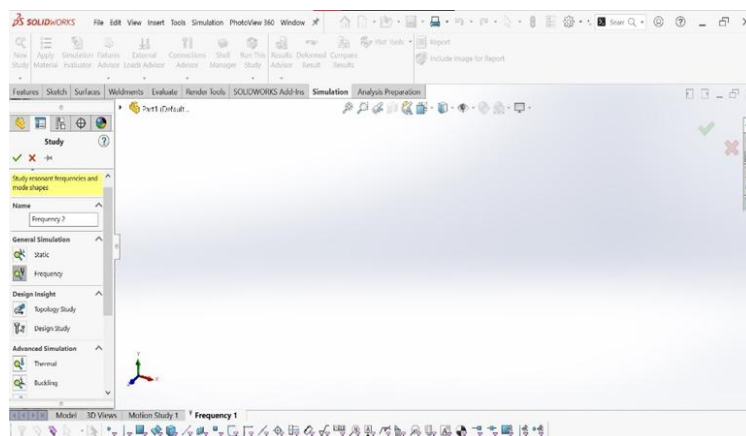
METODOLOGI

Proses penelitian dimulai dengan tahapan Studi Literatur, yaitu mengumpulkan teori dan referensi terkait putaran kritis pada poros, pengaruh retakan (*crack*), serta metode analisis yang relevan seperti analisis teoritis dan *Finite Element Analysis* (FEA). Setelah literatur terkumpul, penelitian dilanjutkan dengan Pemodelan Poros Uji, di mana geometri poros dirancang sesuai variasi diameter dan kedalaman retakan yang ingin dianalisis. Tahap berikutnya adalah Penentuan

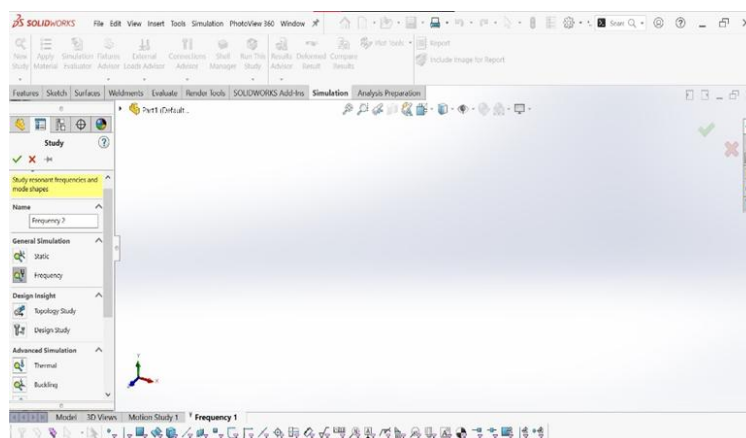
Parameter yang Digunakan, mencakup properti material, kondisi batas, konfigurasi *mesh*, serta variabel lain yang diperlukan untuk perhitungan teoritis dan simulasi FEA. Selanjutnya masuk pada pemilihan Metode yang Digunakan, yang terdiri dari tiga pendekatan, yaitu:

1. Metode Teoretis, menggunakan persamaan Euler–Bernoulli untuk menghitung frekuensi alami dan putaran kritis.
2. FEA Ansys, yaitu simulasi numerik untuk mendapatkan nilai frekuensi alami poros melalui analisis modal.
3. FEA Solidworks, sebagai pembanding analisis modal untuk memvalidasi kecenderungan hasil perhitungan.

Ketiga hasil metode tersebut kemudian dievaluasi pada tahap Pengecekan Sistem terhadap Putaran Kritis, untuk melihat apakah sistem mencapai kondisi frekuensi alami yang menjadi batas putaran kritis. Jika tidak tercapai, maka dilakukan perbaikan pada parameter atau model. Jika tercapai, proses dilanjutkan ke tahap Pengolahan Data. Pada tahap pengolahan data, hasil perhitungan teoritis dan hasil analisis FEA dibandingkan untuk melihat pengaruh diameter poros dan kedalaman retakan terhadap nilai putaran kritis. Proses penelitian diakhiri dengan penyajian data nilai putaran kritis dari Metode Teoretis dan *Finite Element Analysis*, yang kemudian menjadi dasar kesimpulan mengenai kecenderungan perubahan frekuensi alami akibat retakan pada poros.



Gambar 1. Tampilan *Software* FEA Solidworks



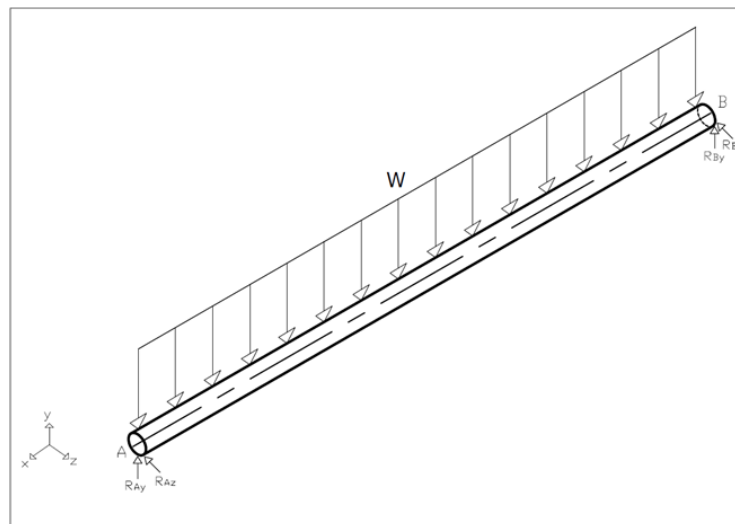
Gambar 2. Tampilan *Software* FEA Ansys

Simulasi numerik dilakukan menggunakan solidworks simulation seperti pada Gambar 1 dan Ansys Workbench pada Gambar 2. Model poros dibuat dengan variasi diameter 20 mm, 25 mm, dan 30 mm serta panjang 650 mm. *Crack* dimodelkan sebagai retakan melintang di tengah poros dengan kedalaman 2 mm, 4 mm, dan 6 mm. Material yang digunakan adalah Aluminium 6063 T6 dengan modulus elastisitas 68,9 GPa dan densitas 2.700 kg/m³.

Tabel 1. Dimensi *Crack* dan Poros

No	Dimensi Poros (mm)		Dimensi Crack (mm)					
	Diameter Poros	Panjang Antar Tumpuan	Crack 1		Crack 2		Crack 3	
			Kedalaman	Lebar	Kedalaman	Lebar	Kedalaman	Lebar
1	20	650	2	1	4	1	6	1
2	25	650	2	1	4	1	6	1
3	30	650	2	1	4	1	6	1

Tabel 1 menunjukkan dimensi poros dan konfigurasi *crack*, di mana terdapat 3 macam ukuran diameter poros serta 3 macam konfigurasi *crack* dengan *crack* ke 1 yaitu *crack* sedalam 2 mm dan lebar celah *crack* 1 mm, *crack* ke 2 yaitu *crack* sedalam 4 mm dan lebar celah *crack* 1 mm dan *crack* yang ke 3 yaitu *crack* sedalam 6 mm dan lebar celah *crack* 1 mm.



Gambar 3. DBB Poros Uji

Pada Gambar 3 yakni DBB sistem dari poros yang akan diuji, di mana terdapat beban terdistribusi sebesar W dengan masing-masing ujung poros diberi tumpuan sendi atau pin, sehingga konfigurasi tumpuan pada sistem ini adalah *pinned-pinned*.

Tabel 2. Nilai Konstanta Tumpuan [1]

End Conditions of Beam	Frequency Equation	Mode Shape (Normal Function)	Value of $\beta_n L$
Pinned-Pinned	$\sin(\beta L) = 0$	$W(x) = C_1 \sin(\beta x)$	$\beta_1 L = \pi$
			$\beta_2 L = 2\pi$
			$\beta_3 L = 3\pi$
			$\beta_4 L = 4\pi$
Free-Free	$\cos(\beta n L) - \cosh(\beta n L) = 0$	$W(x) = C_1 (\sin(\beta x) + \sinh(\beta x)) + C_2 (\cos(\beta x) + \cosh(\beta x))$	$\beta_1 L = 4.730041$
			$\beta_2 L = 7.853204$
			$\beta_3 L = 10.995608$
			$\beta_4 L = 14.137165$
Fixed-Fixed	$\cos(\beta n L) - \cosh(\beta n L) = 1$	$W(x) = C_1 (\sin(\beta x) - \sinh(\beta x)) + C_2 (\cos(\beta x) - \cosh(\beta x))$	$\beta_1 L = 4.730041$
			$\beta_2 L = 7.853204$
			$\beta_3 L = 10.995608$
			$\beta_4 L = 14.137165$

2.1 Metode Teoritis Tanpa Crack

Pada metode ini persamaan yang digunakan adalah persamaan balok Euler-Bernoulli:

$$\omega_n = \frac{(\beta L)^2}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot A}} \quad (1)$$

Di mana:

ω_n : Kecepatan Sudut Alami (rad/s)

β : Nilai Konstanta Tumpuan

L : Panjang Poros (m)

E : Modulus Elastisitas (Pa)

I : Inersia Penampang (m^4)

ρ : Massa Jenis (kg/m^3)

ω_n : Luas Penampang (m^2)

2.1.1 Menentukan Inersia Penampang pada Poros Diameter 20 mm

$$I = \frac{1}{64} \pi D^4 \quad (2)$$

$$I = \frac{1}{64} \pi (0,02)^4$$

$$I = 7,85 \times 10^{-9} m^4$$

2.1.2 Menentukan Volume (V) dan Massa (m) Poros

$$V = \pi r^2 L \quad (3)$$

$$V = \pi \cdot (0,01)^2 \cdot 0,65$$

$$V = 0,000204 m^3$$

$$m = \rho \cdot V \quad (4)$$

$$m = 28700 Kg/m^3 \times 0,0002043$$

$$m = 0,5508 Kg$$

2.1.3 Menentukan Luas Penampang Poros

$$A = \pi r^2 \quad (5)$$

$$A = \pi (0,01)^2$$

$$A = 0,000314 m^2$$

2.1.4 Perhitungan Critical Speed Poros Diameter 20 mm (Tanpa Crack)

Shape Mode ditentukan berdasarkan Persamaan (1).

1) *Shape Mode I*

$$\omega_n = \frac{\pi^2}{0,65 m^2} \sqrt{\frac{(69 \times 10^9) Pa \cdot (7,85 \times 10^{-9}) m^4}{2700 Kg/m^3 \cdot 0,000314 m^2}}$$

$$\omega_n = 23,36 \times 25,28 = 590,45 rad/s$$

$$\omega_n = 2\pi f \quad (6)$$

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{590,45}{2\pi} = 93,97 Hz$$

$$n = f \times 60 = 93,97 \times 60 = 5.638 rpm$$

2) *Shape Mode 2*

$$\omega_n = \frac{(2\pi)^2}{0,65 \text{ m}^2} \sqrt{\frac{(69 \times 10^9) \text{ Pa} \cdot (7,85 \times 10^{-9}) \text{ m}^4}{2700 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0,000314 \text{ m}^2}}$$

$$\omega_n = 93,44 \times 25,28 = 2.361,81 \text{ rad/s}$$

$$\omega_n = 2\pi f$$

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{2361,81}{2\pi} = 375,89 \text{ Hz}$$

$$n = f \times 60 = 375,89 \times 60 = 22.554 \text{ rpm}$$

3) *Shape Mode 3*

$$\omega_n = \frac{(3\pi)^2}{0,65 \text{ m}^2} \sqrt{\frac{(69 \times 10^9) \text{ Pa} \cdot (7,85 \times 10^{-9}) \text{ m}^4}{2700 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0,000314 \text{ m}^2}}$$

$$\omega_n = 210,24 \times 25,28 = 5.314,07 \text{ rad/s}$$

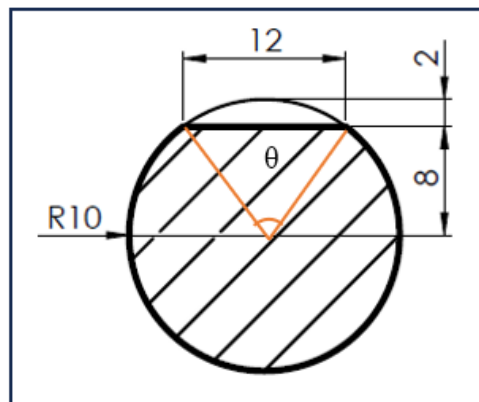
$$\omega_n = 2\pi f$$

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{5314,07}{2\pi} = 845,76 \text{ Hz}$$

$$n = f \times 60 = 845,76 \times 60 = 50.746 \text{ rpm}$$

2.2 Metode Teoritis Dengan Crack

Untuk mencari *Critical Speed* pada poros dengan *crack* menggunakan persamaan yang sama dengan mencari *Critical Speed* tanpa *crack*, hanya saja nilai dari parameter luas penampang dan inersia penampang berubah karena akibat adanya *crack*.

Gambar 4. Penampang Poros Diameter 20 mm dengan *Depth Crack* 2 mm

$$I_{tembereng} = \frac{r^4}{8} \times (\theta - 0,5 \sin (2\theta)) \text{ mm}^4 \quad (7)$$

$$\theta = 2 \cos^{-1} \times \left(\frac{r-h}{r} \right) \text{ rad} \quad (8)$$

$$\theta = 2 \cos^{-1} \times \left(\frac{10-2}{10} \right)$$

$$\theta = 1,28 \text{ rad}$$

$$I_{tembereng} = \frac{10}{8} \times (1,28 - 0,5 \sin(2 \times 1,28)) \text{ mm}^4$$

$$I_{tembereng} = 1256,65 \text{ mm}^4$$

$$I_{circle} = 3,14 \times \frac{20^4}{64}$$

$$I_{circle} = 7850 \text{ mm}^4$$

$$I_{total} = I_{circle} - I_{tembereng}$$

$$I_{total} = 7850 - 1256,65 \text{ mm}^4$$

$$I_{total} = 6593,35 \text{ mm}^4$$

$$I_{total} = 6,59 \times 10^{-09} \text{ m}^4$$

$$A_{tembereng} = r^4 \cos^{-1} \left(\frac{r-h}{r} \right) - (r-h) \sqrt{2rh - h^2}$$

$$A_{tembereng} = 10^4 \cos^{-1} \left(\frac{10-2}{10} \right) - (10-2) \sqrt{(2 \cdot 10 \cdot 2) - (2)^2}$$

$$A_{tembereng} = 16,35 \text{ mm}^2$$

$$A_{circle} = 3,14 \times r^2$$

$$A_{circle} = 3,14 \times 10^2$$

$$A_{circle} = 314 \text{ mm}^2$$

$$A_{total} = A_{circle} - A_{tembereng}$$

$$A_{total} = 314 - 16,35 \text{ mm}^2$$

$$A_{total} = 297,65 \text{ mm}^2$$

$$A_{total} = 0,0002977 \text{ m}^2$$

2.2.1 Shape Mode I

$$\omega_n = \frac{(3,14)^2}{0,65 \text{ m}^2} \sqrt{\frac{(69 \times 10^{10}) \text{ Pa} \cdot (6,59 \times 10^{-9}) \text{ m}^4}{2700 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0,0002977 \text{ m}^2}}$$

$$\omega_n = 23,36 \times 23,78$$

$$\omega_n = 555,61 \text{ rad/s}$$

$$\omega_n = 2\pi f$$

$$f = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{555,61}{2\pi}$$

$$f = 88,47 \text{ Hz}$$

$$n = f \times 60$$

$$n = 88,47 \times 60$$

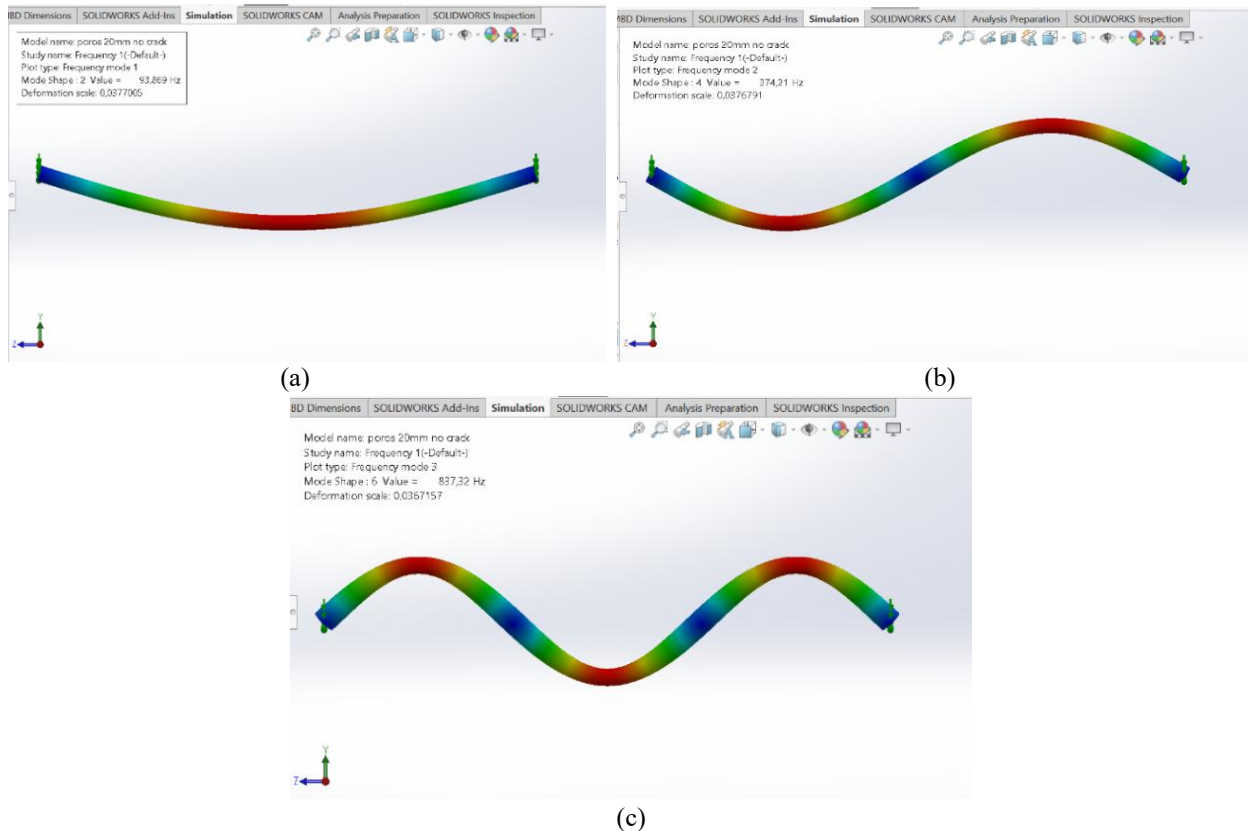
$$n = 5.308 \text{ rpm}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Metode *Finite Element Analysis* Solidworks

3.1.1 Tanpa *Crack*

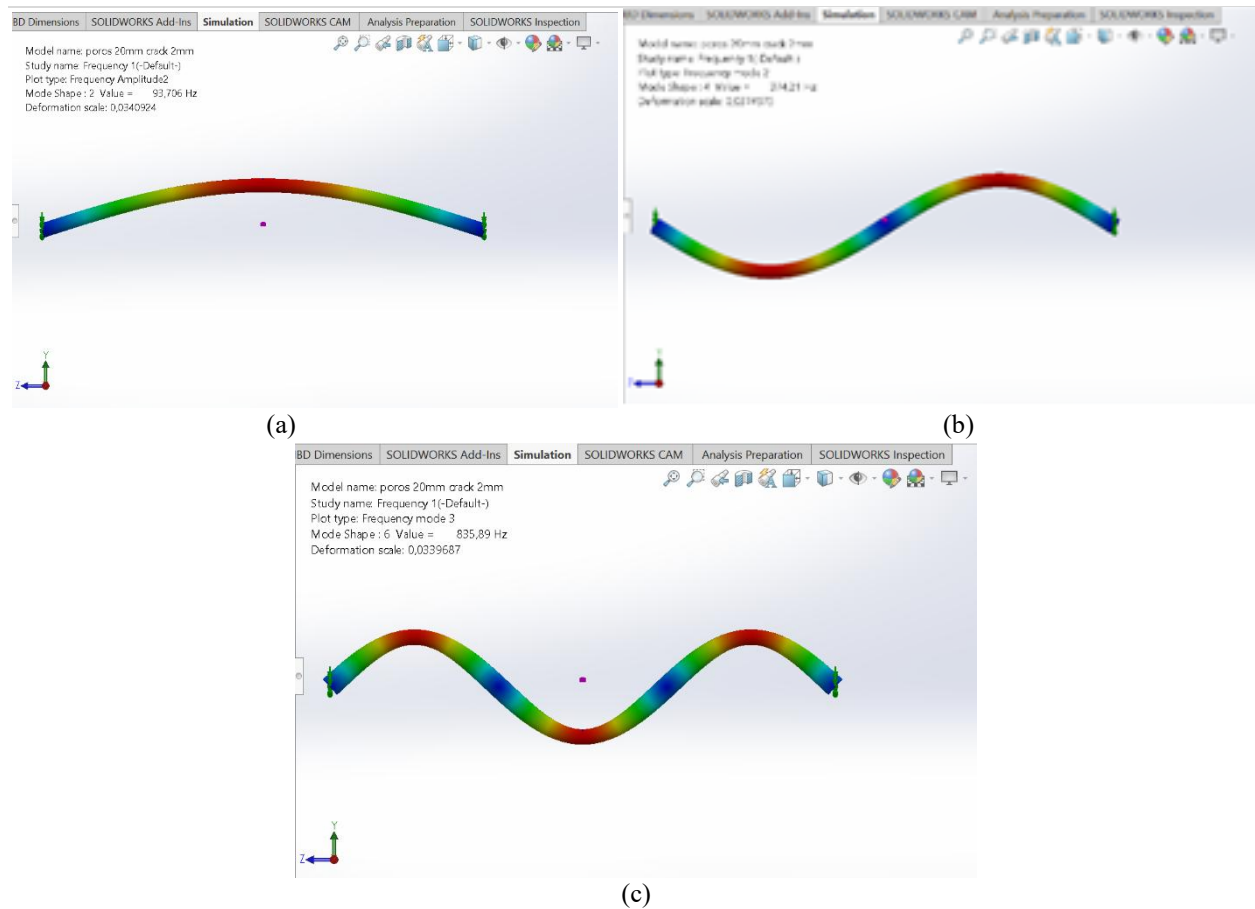
Pada Gambar 5(a) merupakan hasil simulasi frekuensi alami pada Solidworks untuk poros diameter 20 mm tanpa *crack* modulus getar pertama dan diperoleh nilai 93,86 Hz. Kemudian untuk modulus getar kedua terdapat pada Gambar 5(b) dan diperoleh nilai 374,21 Hz. Pada Gambar 5(c) merupakan hasil simulasi frekuensi alami pada solidworks untuk poros diameter 20 mm tanpa *crack* modulus getar ketiga dan diperoleh nilai 837,32 Hz.



Gambar 5. Hasil FEA Solidworks (a) *Mode Shape* 1; (b) *Mode Shape* 2; (c) *Mode Shape* 3

3.1.2 *Depth Crack* 2 mm

Pada Gambar 6(a) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada solidworks untuk poros diameter 20 mm dengan *depth crack* 2 mm modulus getar pertama diperoleh nilai 93,7 Hz. Gambar 6(b) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada solidworks untuk poros diameter 20 mm dengan *depth crack* 2 mm modulus getar kedua diperoleh nilai 374,21 Hz. Gambar 6(c) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada solidworks untuk poros diameter 20 mm dengan *depth crack* 2 mm modulus getar ketiga diperoleh nilai 835,89 Hz.

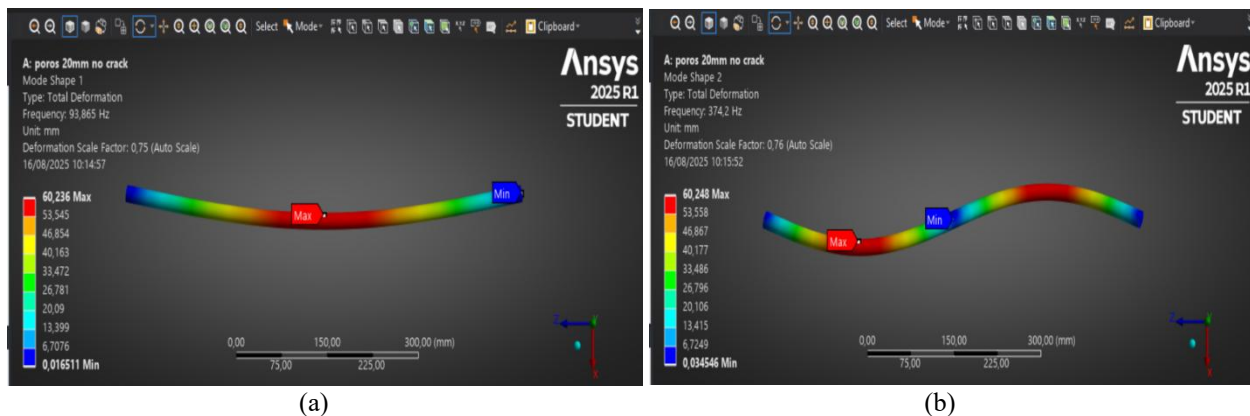


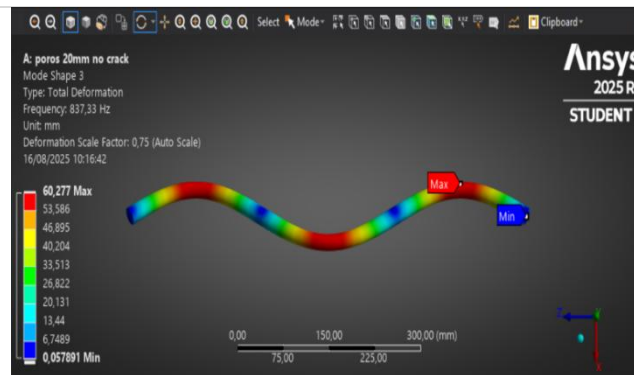
Gambar 6. Hasil FEA Solidworks *Crack* 2 mm (a) *Mode Shape* 1; (b) *Mode Shape* 2; (c) *Mode Shape* 3

3.2 Hasil Metode *Finite Element Analysis* Ansys

3.2.1 Tanpa *Crack*

Pada Gambar 7(a) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada ansys untuk poros diameter 20 mm tanpa *crack* modus getar pertama diperoleh nilai 93,86 Hz. Kemudian Gambar 7(b) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada ansys untuk poros diameter 20 mm tanpa *crack* modus getar kedua diperoleh nilai 374,20 Hz. Gambar 7(c) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada modus getar ketiga diperoleh nilai 837,33 Hz.



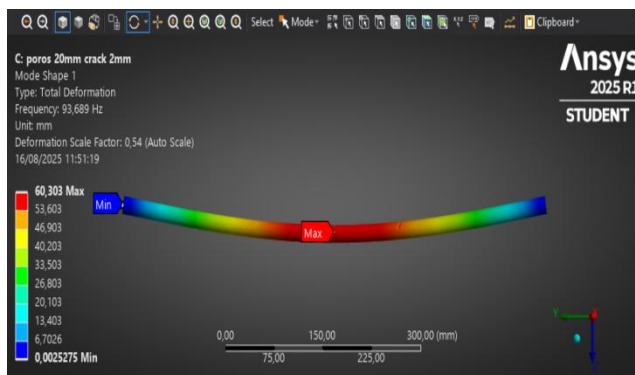


(c)

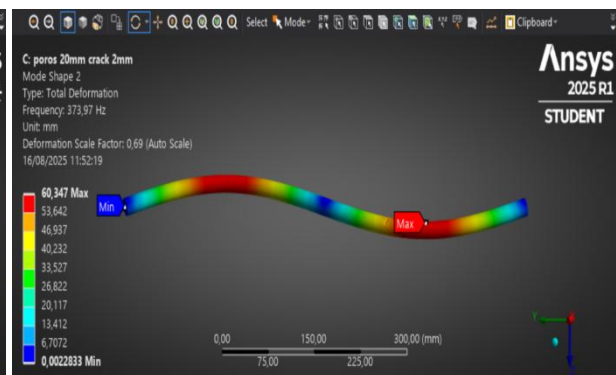
Gambar 7. Hasil FEA Ansys (a) *Mode Shape 1*; (b) *Mode Shape 2*; (c) *Mode Shape 3*

3.2.2 Depth Crack 2 mm

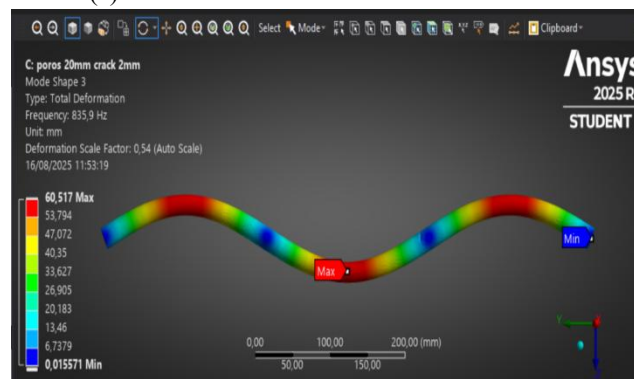
Pada Gambar 8(a) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada ansys untuk poros diameter 20 mm dengan *depth crack* 2 mm modus getar pertama diperoleh nilai 93,68 Hz. Gambar 8(b) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada ansys untuk poros diameter 20 mm dengan *depth crack* 2 mm modus getar kedua diperoleh nilai 373,97 Hz. Gambar 8(c) menunjukkan hasil simulasi frekuensi alami pada ansys untuk poros diameter 20 mm dengan *depth crack* 2 mm modus getar ketiga diperoleh nilai 835,90 Hz.



(a)



(b)



(c)

Gambar 8. Hasil FEA Ansys *Crack* 2 mm (a) *Mode Shape 1*; (b) *Mode Shape 2*; (c) *Mode Shape 3*

3.3 Pembahasan Hasil Metode Teoritis

3.3.1 Tanpa *Crack*

Tabel 3. Hasil Perhitungan Metode Teoritis Tanpa *Crack*

Diameter Poros (mm)	<i>Mode Shape 1</i>		<i>Mode Shape 2</i>		<i>Mode Shape 3</i>	
	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)
20	93,97	5638,2	375,89	22553	845,76	50746
25	117,47	7048,2	469,87	28192	1.057,2	63432
30	140,96	8457,6	563,84	33830	1.268,64	76118

Peningkatan diameter poros pada Tabel 3 menunjukkan tren kenaikan frekuensi alami dan kecepatan kritis pada ketiga mode. Pola ini sesuai dengan temuan Flaieh et al. (2020) [6] yang melaporkan bahwa kenaikan kekakuan lentur poros secara langsung meningkatkan frekuensi alami. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Kekan dan Kumar (2019) [7] yang memperlihatkan bahwa poros berdiameter lebih besar memiliki kemampuan menahan resonansi pada putaran lebih tinggi. Dengan demikian, data teoritis yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan konsistensi dengan literatur yang ada.

3.3.2 Dengan *Crack*

Tabel 4. Hasil Perhitungan Metode Teoritis Dengan *Crack*

Diameter Poros (mm)	<i>Mode Shape 1</i>		<i>Mode Shape 2</i>		<i>Mode Shape 3</i>	
	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)
20	88,47	5.308	82,69	4.961	80,86	4.851
25	112,31	6.738	105,89	6.353	101,73	6.104
30	139,74	8.384	138,8	8.328	136,85	8.211

Pada Tabel 4 menunjukkan bahwa pada diameter poros yang sama, peningkatan kedalaman *crack* (dari 2 mm ke 6 mm) menyebabkan penurunan pada nilai frekuensi alami dan kecepatan kritis. Ini mengindikasikan bahwa keberadaan dan kedalaman retakan mengurangi kekakuan poros, membuatnya lebih rentan terhadap resonansi pada kecepatan putaran yang lebih rendah.

3.4 Pembahasan Hasil Metode *Finite Element Analysis* (FEA)

3.4.1 FEA Solidworks Tanpa *Crack*

Tabel 5. Hasil Perhitungan Metode FEA Solidworks Tanpa *Crack*

Diameter Poros (mm)	<i>Mode Shape 1</i>		<i>Mode Shape 2</i>		<i>Mode Shape 3</i>	
	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)
20	93,87	5632	374,21	22453	837,32	50239
25	117,26	7036	466,59	27995	1040,9	62454
30	140,6	8436	558,22	33493	1240,8	74448

Tabel 5 menampilkan hasil analisis frekuensi alami dan kecepatan kritis poros tanpa *crack* menggunakan metode FEA pada SolidWorks. Dari hasil yang diperoleh, peningkatan diameter poros dari 20 mm hingga 30 mm menyebabkan kenaikan frekuensi alami dan kecepatan kritis pada setiap mode getaran. Hal ini menunjukkan bahwa kekakuan poros meningkat seiring bertambahnya diameter, sehingga respons dinamisnya juga menjadi lebih tinggi. Selain itu, nilai frekuensi dan kecepatan kritis pada mode getaran yang lebih tinggi (Mode 2 dan Mode 3) selalu lebih besar dibanding Mode 1, sesuai karakteristik umum vibrasi poros. Secara keseluruhan, tabel ini mengonfirmasi bahwa perubahan dimensi poros memberi pengaruh signifikan terhadap perilaku dinamis berdasarkan hasil simulasi FEA.

3.4.2 FEA Ansys Tanpa *Crack*Tabel 6. Hasil Perhitungan Metode FEA Ansys Tanpa *Crack*

Diameter Poros (mm)	<i>Mode Shape 1</i>		<i>Mode Shape 2</i>		<i>Mode Shape 3</i>	
	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)
20	93,86	5632	374,2	22452	837,33	50240
25	117,26	7036	466,6	27996	1040,9	62454
30	140,6	8436	558,23	33494	1240,9	74454

Tabel 6 menunjukkan hasil FEA Ansys untuk poros tanpa *crack*. Terlihat bahwa semakin besar diameter poros, nilai frekuensi alami juga meningkat. Misalnya, pada *Mode Shape 1* frekuensi alami naik dari 93,86 Hz (diameter 20 mm) menjadi 140,6 Hz (diameter 30 mm). Pola yang sama juga muncul pada *Mode Shape 2* dan 3, di mana frekuensi alami masing-masing meningkat dari 374,20 Hz → 558,23 Hz dan 837,33 Hz → 1240,90 Hz. Kecepatan kritis ikut meningkat seiring diameter, menegaskan bahwa kekakuan poros berperan besar dalam respon dinamisnya.

3.4.3 FEA Solidworks Dengan *Crack*Tabel 7. Hasil Perhitungan Metode FEA Solidworks Dengan *Crack*

Diameter Poros (mm)	<i>Mode Shape 1</i>		<i>Mode Shape 2</i>		<i>Mode Shape 3</i>	
	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)
20	93,7	5622	93,17	5590	92,05	5523
25	117,11	7027	116,6	6996	115,61	6937
30	140,48	8429	139,99	8399	139,02	8341

Tabel 7 menunjukkan pengaruh ukuran *crack* terhadap frekuensi alami poros berdasarkan analisis FEA Solidworks. Secara umum, semakin besar kedalaman *crack*, frekuensi alami cenderung menurun karena kekakuan poros berkurang. Misalnya, pada diameter 20 mm frekuensi alami turun dari 93,7 Hz pada *crack* 2 mm menjadi 92,05 Hz pada *crack* 6 mm. Pola serupa terjadi pada diameter 25 mm dari 117,11 Hz menjadi 115,61 Hz dan diameter 30 mm dari 140,48 Hz menjadi 139,02 Hz. Penurunan ini juga diikuti oleh berkurangnya nilai kecepatan kritis, menunjukkan bahwa adanya *crack* menyebabkan respon dinamis poros menjadi lebih lemah.

3.4.4 FEA Ansys Dengan *Crack*Tabel 8. Hasil Perhitungan Metode FEA Ansys Dengan *Crack*

Diameter Poros (mm)	<i>Mode Shape 1</i>		<i>Mode Shape 2</i>		<i>Mode Shape 3</i>	
	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)	Frekuensi Alami (Hz)	Critical Speed (Rpm)
20	93,69	5621	93,15	5589	91,98	5519
25	117,11	7027	116,58	6995	115,54	6932
30	140,47	8428	139,96	8398	139	8340

Tabel 8 menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman *crack*, frekuensi alami dan kecepatan kritis poros sedikit menurun. Misalnya, pada diameter 20 mm frekuensi alami turun dari 93,69 Hz (*crack* 2 mm) menjadi 91,98 Hz (*crack* 6 mm). Tren yang sama terlihat pada diameter 25 mm dan 30 mm, menandakan bahwa *crack* mengurangi kekakuan dan menurunkan respons dinamis poros.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis teoritis dan pemodelan numerik menggunakan FEA SolidWorks serta FEA Ansys, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Diameter poros memiliki pengaruh langsung terhadap peningkatan frekuensi alami. Pada kondisi tanpa *crack*, frekuensi alami mode 1 meningkat dari 93,9 Hz pada diameter 20 mm menjadi 140,90 Hz pada diameter 30 mm. Kenaikan serupa juga terjadi pada Mode 2, yaitu dari 375 Hz menjadi 563 Hz, serta pada Mode 3 dari 845 Hz menjadi 1240,00 Hz. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan diameter meningkatkan kekakuan poros secara signifikan.
2. Kecepatan kritis meningkat seiring bertambahnya diameter poros. Hasil FEA menunjukkan bahwa kecepatan kritis mode 1 naik dari 5632 rpm (diameter 20 mm) menjadi 8436 rpm (diameter 30 mm). Peningkatan ini konsisten pada seluruh mode getaran dan seluruh metode perhitungan.
3. Kehadiran *crack* menyebabkan penurunan frekuensi alami dan kecepatan kritis. Pada hasil FEA Solidworks, frekuensi alami diameter 20 mm turun dari 93,7 Hz (*crack* 2 mm) menjadi 92,05 Hz (*crack* 6 mm). Penurunan serupa terjadi pada diameter 25 mm (117,11 Hz menjadi 115,61 Hz) dan diameter 30 mm (140,48 Hz menjadi 139,02 Hz).
4. Kecepatan kritis juga menurun akibat pertambahan ukuran *crack*. Pada diameter 25 mm, kecepatan kritis Mode 1 berkurang dari 7027 rpm (*crack* 2 mm) menjadi 6937 rpm (*crack* 6 mm). Hal ini menunjukkan penurunan kekakuan akibat retak yang semakin besar.
5. Hasil teoritis, FEA Solidworks, dan FEA Ansys menunjukkan konsistensi tren. Perbedaan antar metode berada dalam kisaran $\pm 0,5$ –1%, sehingga dapat disimpulkan bahwa model yang digunakan valid dan mampu menggambarkan perilaku dinamis poros dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 6th ed. United Kingdom: Pearson, 2018.
- [2] W. T. Thomson and M. D. Dahleh, *Theory of Vibration with Applications*, 5th ed. New York: Pearson, 1997.
- [3] D. E. Bently, C. T. Hatch, and B. Grissom, *Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics*. New York: ASME Press, 2002. doi: <https://doi.org/10.1115/1.801FRM>.
- [4] W. W. Seto, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Mechanical Vibrations*. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [5] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [6] E. H. Flaieh, F. O. Hamdoon, and A. A. Jaber, "Estimation the Natural Frequencies of a Cracked Shaft Based on Finite Element Modeling and Artificial Neural Network," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 1410–1416, 2020, doi: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.10.4.12211>.
- [7] A. H. Kekan and B. R. Kumar, "Critical Speed and Natural Frequency Analysis of Cracked Rotor Shaft," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 232–240, 2019.
- [8] A. Kumawat, K. B. Waghulde, and S. Kumawat, "FEM Based Modal and Harmonic Response Study of Stepped Shaft Having Cracks and Optimize Using ANN Method," *J. Eng. Res. Reports*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, 2020, doi: <https://doi.org/10.9734/jerr/2020/v14i117112>.
- [9] R. Budynas and K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2010.
- [10] A. M. Zainuri, *Kekuatan Bahan (Strength of Materials)*. Yogyakarta: Andi, 2008.