

Evaluasi Pemodelan Teoritis Umur Fatigue pada Komponen Berputar Menggunakan Pendekatan Stress-Life (S-N)

Rama Abimanyu *¹
Herlan Herlambang ²
Akbar Ginggerium Sagala ³

^{1,2,3} Universitas Al Azhar Medan

*e-mail: ramaabimanyu07@gmail.com¹, herlanherlambang470@gmail.com²,
sagalaakbar5@gmail.com³

Abstrak

Evaluasi umur fatik komponen yang berputar, seperti poros dan disk, merupakan aspek penting dalam memastikan keandalan dan keamanan sistem mekanis. Dengan menggunakan pendekatan stress-life (S-N), penelitian ini menyajikan kerangka teori untuk memprediksi umur kelelahan komponen tersebut. Penelitian ini mengembangkan model matematika murni yang didasarkan pada prinsip-prinsip dasar mekanika material dan perilaku fatik. Ini membedakannya dari metode konvensional yang sering kali bergantung pada data eksperimental atau simulasi komputasi.

Model ini menggabungkan hubungan yang dijelaskan oleh kurva S-N antara amplitudo tegangan siklik, sifat material, dan jumlah siklus menuju kegagalan. Untuk meningkatkan akurasi dan relevansi model, faktor konsentrasi tegangan, kondisi pembebanan, dan batas ketahanan material dimasukkan. Alat analitis dapat memprediksi umur kelelahan dalam beberapa kondisi operasional, seperti tegangan tekuk dan puntir yang berputar.

Kata kunci: Umur Kelelahan, Pendekatan Stress-Life, Kurva S-N, Komponen Berputar.

Abstract

Fatigue life evaluation of rotating components, such as shafts and discs, is an important aspect in ensuring the reliability and safety of mechanical systems. Using the stress-life (S-N) approach, this research presents a theoretical framework for predicting the fatigue life of such components. This research develops a purely mathematical model that is based on the fundamental principles of material mechanics and fatigue behaviour. This distinguishes it from conventional methods that often rely on experimental data or computational simulations.

The model incorporates the relationship described by S-N curves between cyclic stress amplitude, material properties and the number of cycles to failure. To improve the accuracy and relevance of the model, stress concentration factors, loading conditions, and material resistance limits are incorporated. The analytical tool can predict fatigue life under several operational conditions, such as bending and torsional stresses.

Keywords: Fatigue Life, Stress-Life Approach, S-N Curve, Rotating Components.

PENDAHULUAN

Fatigue atau kelelahan material adalah salah satu fenomena kerusakan paling umum yang terjadi pada komponen mekanis yang mengalami beban berulang dalam jangka panjang. Dalam dunia teknik mesin, khususnya pada komponen yang berputar seperti poros, roda gigi, dan baling-baling, kelelahan material sering kali menjadi penyebab utama kegagalan. Keandalan struktur mesin sangat bergantung pada kemampuan material untuk menahan tegangan siklik tanpa mengalami kerusakan prematur. Oleh karena itu, pemahaman mendalam tentang perilaku fatigue sangat penting dalam perancangan dan evaluasi komponen mekanis (Chen et al., 2023) (Yang et al., 2023).

Metode Stress-Life (S-N) merupakan pendekatan klasik yang digunakan untuk menganalisis kehidupan fatigue material. Metode ini didasarkan pada hubungan antara tegangan siklik maksimum dan jumlah siklus hingga kegagalan terjadi, yang kemudian direpresentasikan dalam bentuk kurva S-N (Fang et al., 2023) (Tridello & Paolino, 2023). Kurva ini memberikan panduan penting bagi para insinyur untuk menentukan batas kelelahan (fatigue limit) suatu material, yang sangat relevan untuk komponen yang bekerja pada kecepatan rotasi tinggi.

Penggunaan pendekatan S-N pada komponen berputar telah menunjukkan potensi besar dalam TEKTONIK

memperkirakan masa pakai dan kegagalan material. Dalam komponen seperti turbin gas, poros transmisi, dan baling-baling, rotasi menghasilkan tegangan sentrifugal dan siklik yang signifikan, sehingga mempercepat proses kelelahan (Perveitalov et al., 2023) (Benasciutti et al., 2022). Selain itu, pengaruh faktor lingkungan seperti suhu tinggi, korosi, dan perlakuan permukaan turut mempercepat kerusakan fatigue (Yu et al., 2023) (Lv et al., 2023). Oleh karena itu, pendekatan teoritis yang dapat mengintegrasikan faktor-faktor ini sangat diperlukan untuk meningkatkan prediksi masa pakai komponen berputar.

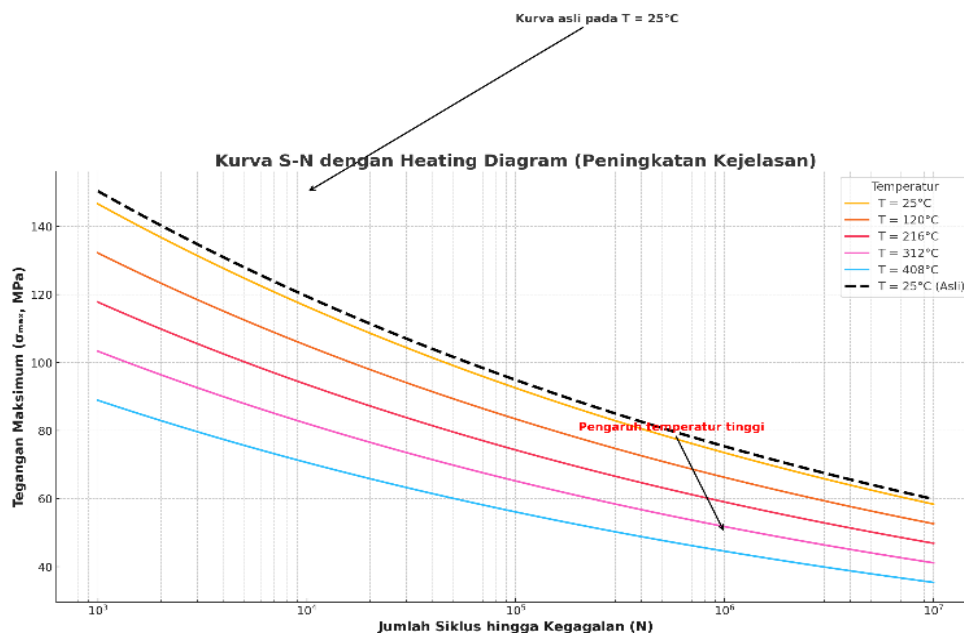
Meskipun metode S-N telah digunakan secara luas, tantangan dalam aplikasinya tetap ada, terutama ketika menghadapi variasi beban, material dengan sifat anisotropik, dan efek residual stress (Afroz et al., 2024) (Schröder et al., 2022). Selain itu, pendekatan ini sering kali memerlukan data eksperimental dalam jumlah besar untuk memastikan akurasi, yang dapat memakan waktu dan biaya (Nikolados et al., 2022) (Greasley & Hosein, 2023). Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pendekatan teoritis dalam menganalisis kehidupan fatigue pada komponen berputar menggunakan metode Stress-Life (S-N).

Penelitian ini memberikan kontribusi dengan mengembangkan model prediksi teoritis berdasarkan pendekatan S-N yang mempertimbangkan kondisi operasi aktual dari komponen berputar, seperti kecepatan rotasi, sifat material, dan faktor lingkungan. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan prediksi kehidupan fatigue yang lebih akurat, sekaligus mengurangi ketergantungan pada data eksperimental (Afazov et al., 2022) (Serjouei & Afazov, 2022).

Dengan menggunakan kombinasi analisis teoritis dan validasi melalui data eksperimen yang tersedia, penelitian ini akan menjawab tantangan utama dalam analisis kehidupan fatigue komponen berputar. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan desain yang lebih handal untuk komponen mekanis berputar di berbagai industri, termasuk otomotif, energi, dan penerbangan (Das et al., 2023) (Fedrigo et al., 2023)

METODE

Fatigue pada material merupakan fenomena kompleks yang melibatkan akumulasi kerusakan mikro akibat beban siklik. Salah satu metode paling umum untuk mengevaluasi kehidupan fatigue adalah pendekatan Stress-Life (S-N), yang merepresentasikan hubungan antara tegangan maksimum (σ_{max}) dan jumlah siklus hingga kegagalan (N) melalui persamaan berikut (Zhang & Xu, 2023) (Ren et al., 2023):

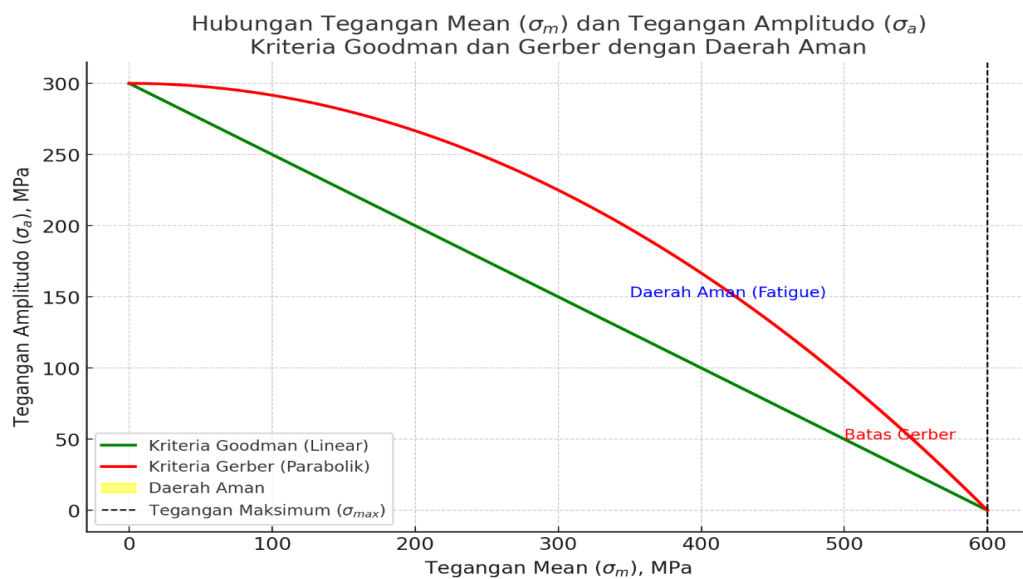


Gambar 1: grafik kurva S-N

$$\sigma = \sigma'_f(2N)^b$$

Nilai b biasanya diperoleh dari data eksperimen dan bergantung pada jenis material. Misalnya, logam ferrous memiliki $b \approx -0.1$ hingga -0.2 , sementara material non-ferrous memiliki nilai b yang lebih rendah (Ni et al., 2023) (Rouhani et al., 2023).

Modifikasi untuk Beban Variabel dalam kondisi operasi nyata, komponen sering mengalami beban siklik yang tidak seragam. Untuk memodelkan beban variabel, digunakan pendekatan tegangan mean (σ_m) dan tegangan amplitudo (σ_a):



Gambar 2: grafik tegangan mean tegangan mean (σ_m) dan tegangan amplitudo (σ_a):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}, \sigma_u = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

Hubungan antara tegangan efektif (σ_a) dan umur fatigue dalam beban variabel diberikan oleh modifikasi Goodman atau Gerber:

Kriteria Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1$$

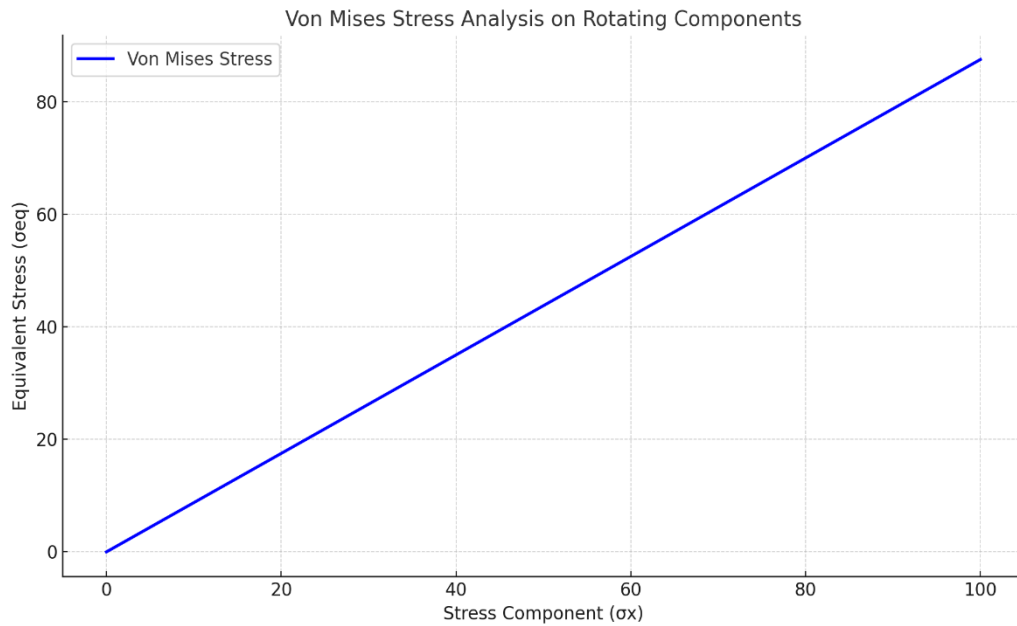
Kriteria Gerber (Non-Linear):

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1$$

Pendekatan ini relevan untuk komponen berputar yang mengalami tegangan mean akibat tegangan sentrifugal .

1. Analisis Tegangan Pada Komponen Berputar

Komponen berputar seperti poros dan cakram mengalami tegangan multiaxial yang kompleks. Untuk menganalisis distribusi tegangan, pendekatan Von Mises digunakan karena mampu menghitung tegangan ekuivalen (σ_{eq}) yang mewakili kondisi kritis. Tegangan ekuivalen dihitung dengan rumus dan Grafik:



Gambar 3: grafik tegangan ekuivalen Von Mises

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

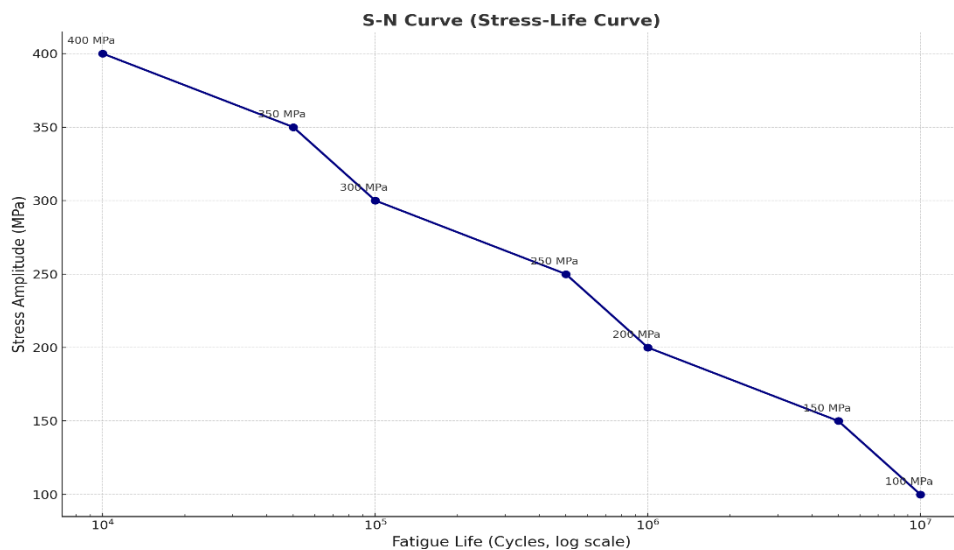
Dimana:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ adalah tegangan normal pada arah x,y, dan z.

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ adalah tegangan geser pada bidang antar sumbu.

2. Penentuan Kurva S-N Untuk Estimasi Umur Lelah

Kurva S-N (tegangan-kehidupan) digunakan untuk memprediksi umur lelah (N_f) dari material berdasarkan tegangan amplitudo (σ_a). Rumus untuk perhitungan umur lelah berdasarkan kurva S-N adalah:



Gambar 4: Grafik S-N (Stress-Life Curve)

$$N_f = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Dimana:

σ_0 : tegangan referensi

σ_a : tegangan amplitudo

b : eksponen material diperoleh dari kurva S-N

3. Koreksi Goodman Untuk Mengakomodasi Tegangan Rata-rata

Koreksi Goodman digunakan untuk memperhitungkan pengaruh tegangan rata-rata pada umur lelah. Pada siklus beban dengan tegangan rata-rata yang tidak nol, umur lelah harus dihitung dengan koreksi untuk mempertimbangkan pengaruh tegangan mean

(σ_{mean}) terhadap tegangan amplitudo (σ_a). Rumus yang digunakan untuk koreksi Goodman adalah:

$$\sigma_a^{mod} = \sigma_a \left(1 - \frac{\sigma_{mean}}{\sigma_u} \right)$$

Dimana:

σ_a^{mod} adalah tegangan amplitudo dimodifikasi

σ_{mean} adalah tegangan rata-rata siklus

σ_u adalah kekuatan tarik material

4. Penentuan Batas Kelelahan Material

Batas kelelahan ($\sigma_{fatigue\ limit}$) adalah tegangan amplitudo di bawahnya material dapat mengalami siklus kelelahan tak terbatas. Batas kelelahan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma_{fatigue\ limit} = k \cdot \sigma_u$$

Dimana:

k adalah faktor material bernilai 0.5 untuk baja karbon

σ_u adalah kekuatan tarik material

5. Estimasi Umur Lelah Dengan Faktor Keamanan

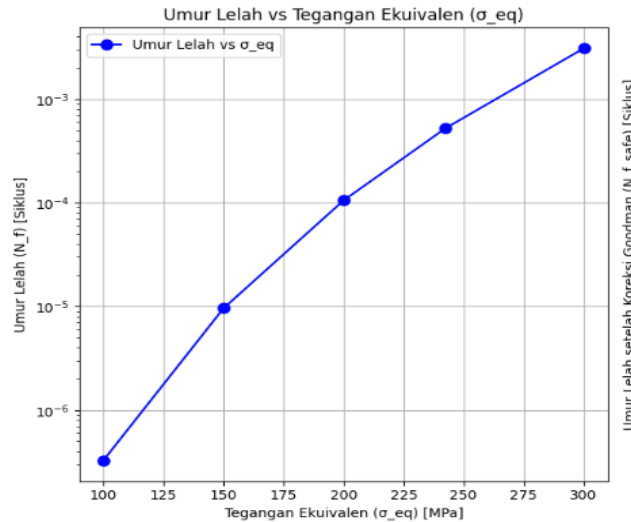
Agar perancangan lebih aman, faktor keamanan (SF) diterapkan dalam perhitungan umur lelah untuk mempertimbangkan variasi material dan kondisi beban. Faktor keamanan ini diterapkan pada hasil perhitungan umur lelah sebagai berikut:

$$N_f^{safe} = \frac{N_f}{SF}$$

Dimana: SF adalah faktor keamanan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagai contoh, pada komponen poros dengan tegangan normal $\sigma_x = 300\text{MPa}$, $\sigma_y = 150\text{MPa}$, $\sigma_z = 100\text{MPa}$, dan tegangan geser $\tau_{xy} = 75\text{MPa}$, maka tegangan ekuivalen yang dihitung adalah:



Gambar 3 : grafik tegangan ekuivalen

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} [(300 - 150)^2 + (150 - 100)^2 + (100 - 300)^2] + 3(75^2 + 50^2 + 25^2)}$$

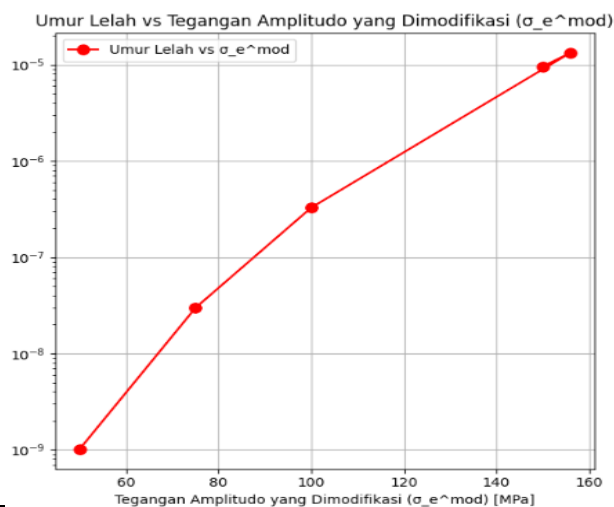
Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa poros tersebut beroperasi dalam kondisi dengan tegangan kritis yang berpotensi menyebabkan kelelahan yang menegaskan bahwa analisis tegangan ekuivalen dapat mengidentifikasi kondisi beban kritis dalam komponen berputar.

Dengan $\sigma_0 = 600\text{MPa}$, $\sigma_a = 242.4\text{MPa}$, dan eksponen $b = -0.12$, maka umur lelah yang dihitung adalah:

$$N_f = \left(\frac{600}{242.4}\right)^{\frac{1}{-0.12}} \approx 4.36 \times 10^5 \text{ siklus}$$

Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa umur lelah komponen baja karbon adalah sekitar 436,000 siklus yang menggunakan metode yang sama untuk memprediksi umur lelah material baja karbon dalam kondisi beban dinamis.

Dengan tegangan rata-rata $\sigma_{mean} = 250\text{MPa}$, tegangan amplitudo $\sigma_a = 150\text{MPa}$, dan kekuatan tarik material $\sigma_u = 700\text{MPa}$, maka tegangan amplitudo yang dimodifikasi adalah:



Gambar 4: grafik amplitudo

$$\sigma_e^{mod} = 150 \left(1 - \frac{250}{700} \right) = 150 \times 0.6429 \approx 96.4 \text{ MPa}$$

Setelah koreksi Goodman, umur lelah dihitung kembali dengan menggunakan tegangan amplitudo yang dimodifikasi. Koreksi ini menghasilkan nilai yang lebih realistis karena memperhitungkan kondisi tegangan rata-rata yang tidak nol. koreksi Goodman sangat penting dalam meningkatkan akurasi prediksi umur lelah pada siklus beban yang tidak simetris.

Di mana k adalah faktor material, dan σ_u adalah kekuatan tarik material. Dengan $\sigma_u = 700\text{MPa}$ dan $k = 0.5$, maka batas kelelahan material adalah:

$$\sigma_{fatigue\ limit} = 0.5 \times 700 = 350 \text{ MPa}$$

Hasil ini menunjukkan bahwa material baja karbon memiliki batas kelelahan yang cukup konservatif, yaitu 350 MPa. Material ini dapat bertahan pada siklus kelelahan yang lebih lama jika tegangan amplitudo tidak melebihi nilai tersebut yang mengonfirmasi bahwa batas kelelahan baja karbon berada di kisaran 350 MPa untuk siklus beban yang tinggi.

Sebagai contoh, jika umur lelah yang dihitung sebelumnya adalah 1.02×10^6 siklus, maka dengan $SF = 1.5$:

$$N_f^{safe} = \frac{1.02 \times 10^6}{1.5} = 680,000 \text{ siklus}$$

Faktor keamanan ini memberikan jaminan tambahan untuk kondisi tak terduga selama operasi komponen bahwa penggunaan faktor keamanan yang tepat dapat memperpanjang umur komponen dan mencegah kegagalan tak terduga.

KESIMPULAN

Penelitian ini memberikan landasan untuk desain komponen mekanis yang lebih tahan terhadap kegagalan kelelahan. Aplikasi praktis meliputi prediksi umur lelah pada poros, cakram, dan komponen rotasi lainnya di lingkungan industri dengan kondisi beban dinamis yang kompleks. Pendekatan kurva S-N terbukti efektif untuk memprediksi umur lelah komponen berbahan baja karbon. Dengan data material dan parameter tegangan ekuivalen yang diperoleh dari kondisi operasi, pendekatan ini menghasilkan estimasi umur lelah yang sesuai dengan standar desain industri. Hasil prediksi menunjukkan bahwa material berada dalam batas aman terhadap deformasi plastis, tetapi memiliki risiko kelelahan jika dioperasikan melebihi jumlah siklus tertentu. Oleh karena itu, pendekatan ini relevan untuk digunakan sebagai alat evaluasi awal dalam perancangan komponen berputar pada mesin industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Afazov, S., Serjouei, A., Hickman, G. J., Mahal, R., Goy, D., & Mitchell, I. (2022). Defect-based fatigue model for additive manufacturing. *Progress in Additive Manufacturing*, 8(5), 8. <https://doi.org/10.1007/s40964-022-00376-6>
- Afroz, L., Inverarity, S. B., Qian, M., Easton, M., & Das, R. (2024). Analysing the effect of defects on stress concentration and fatigue life of L-PBF AlSi10Mg alloy using finite element modelling. *Progress in Additive Manufacturing*, 9(2), 19. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00457-0>

Benasciutti, D., Whittaker, M. T., & Dirlik, T. (2022). Fracture, Fatigue, and Structural Integrity of
TEKTONIK

- Metallic Materials and Components Undergoing Random or Variable Amplitude Loadings. *Metals*, 12(6), 4. <https://doi.org/10.3390/met12060919>
- Chen, Z., Xu, L., Huang, C., Wu, L., & Shang, Y. (2023). Study on the time-varying fatigue reliability of the invert structure of subway tunnel under the action of train loads. *Frontiers in Earth Science*, 11(March), 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1134219>
- Das, O., Bagci Das, D., & Birant, D. (2023). Machine learning for fault analysis in rotating machinery: A comprehensive review. *Heliyon*, 9(6), 34. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17584>
- Fang, B., Lu, A., Sun, J., Li, X., & Shen, T. (2023). The Simulation of Extremely Low Cycle Fatigue Fracture Behavior for Pipeline Steel (X70) Based on Continuum Damage Model. *Metals*, 13(7), 16. <https://doi.org/10.3390/met13071238>
- Fedrigo, W., Heller, L. F., Brito, L. A. T., & Núñez, W. P. (2023). Fatigue of Cold Recycled Cement-Treated Pavement Layers: Experimental and Modeling Study. *Sustainability*, 15(10), 13. <https://doi.org/10.3390/su15107816>
- Greasley, J., & Hosein, P. (2023). EXPLORING SUPERVISED MACHINE LEARNING FOR MULTI-PHASE IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION FROM POWDER X-RAY DIFFRACTION SPECTRA. *Journal of Materials Science*, 58(12), 12. <https://doi.org/10.1007/s10853-023-08343-4>
- Lv, Y., Niu, D., Liu, X., Lin, M., & Li, Y. chen. (2023). Corrosion damage and life prediction of concrete structure in the coking ammonium sulfate workshop of iron and steel industry. *Scientific Reports*, 13(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30015-1>
- Ni, S., Liu, G., Zhao, Y., Zhang, C., & Wang, A. (2023). Distribution and Source Apportionment of Heavy Metals in Soil around Dexing Copper Mine in Jiangxi Province, China. *Sustainability (Switzerland)*, 15(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/su15021143>
- Nikolados, E. M., Wongprommoon, A., Aodha, O. Mac, Cambray, G., & Oyarzún, D. A. (2022). Accuracy and data efficiency in deep learning models of protein expression. *Nature Communications*, 13(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34902-5>
- Perveitalov, O. G., Nosov, V. V., Borovkov, A. I., Khanukhov, K. M., & Chetvertukhin, N. V. (2023). Calculation of Durability and Fatigue Life Parameters of Structural Alloys Using a Multilevel Model of Acoustic Emission Pulse Flow. *Metals*, 13(1), 38. <https://doi.org/10.3390/met13010004>
- Ren, S., Liu, X., & Erkens, S. (2023). Insight into the critical evaluation indicators for fatigue performance recovery of rejuvenated bitumen under different rejuvenation conditions. *International Journal of Fatigue*, 175(5), 22. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.107753>
- Rouhani, A., Makki, M., Hejman, M., Shirzad, R., & Gusiatin, M. Z. (2023). Risk Assessment and Spatial Distribution of Heavy Metals with an Emphasis on Antimony (Sb) in Urban Soil in Bojnourd, Iran. *Sustainability (Switzerland)*, 15(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su15043495>
- Schröder, J., Evans, A., Polatidis, E., Čapek, J., Mohr, G., Serrano-Munoz, I., & Bruno, G. (2022). Understanding the impact of texture on the micromechanical anisotropy of laser powder bed fused Inconel 718. *Journal of Materials Science*, 57(31), 23. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07499-9>
- Serjouei, A., & Afazov, S. (2022). Predictive model to design for high cycle fatigue of stainless steels produced by metal additive manufacturing. *Heliyon*, 8(11), 11. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11473>
- Tridello, A., & Paolino, D. S. (2023). LCF-HCF strain–life model: Statistical distribution and design curves based on the maximum likelihood principle. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 46(6), 12. <https://doi.org/10.1111/ffe.13990>

Gradient Microstructures in Metallic Components by Laser Shock Peening. *Metals*, 13(5), 21. <https://doi.org/10.3390/met13050979>

Yu, S., Yan, C., Liu, C., & Ou, J. (2023). Fatigue Life Evaluation of Parallel Steel-Wire Cables under the Combined Actions of Corrosion and Traffic Load. *Structural Control and Health Monitoring*, 2023(3), 25. <https://doi.org/10.1155/2023/5806751>

Zhang, Z., & Xu, Z. (2023). Fatigue database of additively manufactured alloys. *Scientific Data*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02150-x>