

PENGARUH VARIASI DESAIN DAN PEMBEBANAN TERHADAP UMUR KELELAHAN *RING DIES* PADA MESIN *WOOD PELLET*

- 1) Mahasiswa Program Studi
S1 Teknik Mesin, Jurusan
Teknik Mesin dan Industri,
Universitas Tidar
- 2,3) Dosen Program Studi S1
Teknik Mesin, Jurusan
Teknik Mesin dan Industri,
Universitas Tidar
- 4) Dosen Program Studi D4
Teknologi Rekayasa
Perancangan Manufaktur,
Jurusan Teknik Mesin dan
Industri, Universitas Tidar

Sahal Sinatrya Abidin^{1*)}, Fuad Hilmy²⁾, Ikhwan Taufik³⁾,
Sigit Joko Purnomo⁴⁾

Corresponding email *) :
sahal.sinatrya28@gmail.com

Received: 12-06-2025
Accepted: 28-06-2025
Published: 28-06-2026

©2026 Politala Press.
All Rights Reserved.

Abstrak. Peningkatan kebutuhan akan energi ramah lingkungan mendorong pemanfaatan wood pellet sebagai alternatif bahan bakar fosil. Ring dies merupakan komponen utama dalam mesin produksi wood pellet yang bekerja di bawah pembebanan siklik, sehingga rentan mengalami kegagalan akibat kelelahan material. Penelitian ini menyelidiki pengaruh variasi desain geometri dan tekanan pembebanan terhadap umur kelelahan ring dies berbahan baja paduan 42CrMo4. Tiga konfigurasi desain ring dies yaitu single pad, double pad, dan half pad disimulasikan pada tekanan 100, 135, dan 150 MPa menggunakan metode elemen hingga dan pendekatan kurva S-N. Hasil menunjukkan bahwa desain half pad menghasilkan distribusi tegangan paling rendah dan umur kelelahan tertinggi, sedangkan desain single pad mengindikasikan konsentrasi tegangan tertinggi dan umur kelelahan terendah. Tekanan pembebanan yang lebih besar mempercepat degradasi kelelahan. Temuan ini menegaskan pentingnya optimalisasi desain geometris untuk meningkatkan ketahanan dan efisiensi komponen dalam sistem produksi. Kata Kunci: Ring dies, kelelahan material, 42CrMo4, desain geometri, Metode Elemen Hingga.

Abstract. The increasing demand for environmentally friendly energy has driven the utilization of wood pellets as an alternative to fossil fuels. Ring dies are critical components in wood pellet production machines that operate under cyclic loading conditions, making them susceptible to fatigue failure. This study investigates the influence of geometric design variations and loading pressures on the fatigue life of ring dies made from 42CrMo4 alloy steel. Three design configurations single pad, double pad, and half pad were simulated under 100, 135, and 150 MPa loading conditions using the finite element method and S-N curve approach. The results show that the half pad design yields the lowest stress distribution and the longest fatigue life, while the single pad design exhibits the highest stress concentration and the shortest fatigue life. Higher loading pressures accelerate fatigue degradation. These findings highlight the importance of geometric design optimization to enhance component durability and efficiency in pellet production systems. Keywords: Ring dies, fatigue life, 42CrMo4, geometric design, Finite Element Method.

To cite this article: <https://doi.org/10.34128/je.v13i1.377>

1. Pendahuluan

Sumber energi utama saat ini sebagian besar tidak terbarukan, antara lain gas alam, minyak bumi, batu bara, gambut, dan tenaga nuklir konvensional [1]. Penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama telah menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan seperti pemanasan global dan polusi udara [2]. Untuk mengendalikan polusi ini dan untuk menyelamatkan produk minyak bumi, biomassa mempunyai peran penting dalam mengubah sistem energi dunia menjadi sumber energi terbarukan dan pembawa energi [3]. Salah satu produk biomassa yaitu *wood pellet* yang merupakan energi terkompresi mudah terbakar dan digunakan sebagai

bahan bakar. Penggunaan *wood pellet* sebagai bahan bakar juga mendapatkan popularitas di industri Manufaktur dan pengolahan *boiler* oleh banyak industri dunia [4].

Produksi *wood pellet* global meningkat dari 5 juta ton pada tahun 2005 menjadi 32 juta ton pada tahun 2017 kemudian mencapai 36 juta ton pada tahun 2018, dan hampir 40 juta ton pada tahun 2019 [5]. Produksi diharapkan akan mencapai lebih dari 60 juta ton pada tahun 2025. Sejalan dengan perkiraan tersebut, Uni Eropa telah menetapkan target bahwa 27% dari total konsumsi energi pada tahun 2030 dihasilkan dari sumber energi terbarukan [5]. Terdapat dua jenis pabrik *wood pellet*, yaitu pabrik *wood pellet flat dies* dan pabrik *wood pellet ring dies*. Secara struktural, *ring dies* memiliki kompleksitas geometri yang lebih tinggi, dimensi dan bobot yang lebih besar, yang juga mengakibatkan biaya produksi tinggi [5]. Namun demikian, *Ring dies* lebih umum digunakan dalam praktik industri karena memiliki kekuatan yang tinggi, keausan yang lebih sedikit, masa pakai lebih lama, dan keluaran per jamnya yang tinggi dengan konsumsi energi lebih rendah dibandingkan dengan *flat dies* [6].

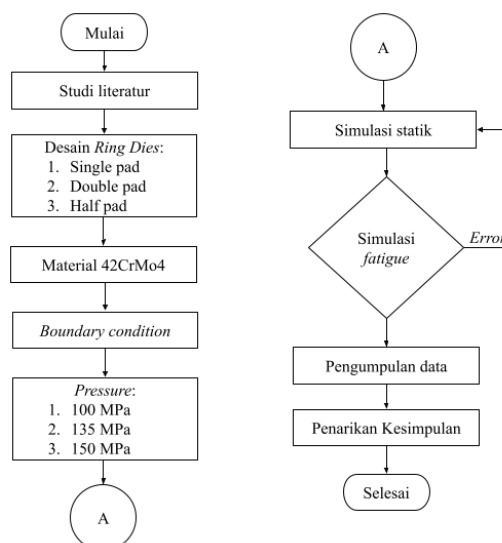
Secara mekanik, *ring dies* bekerja dalam kondisi ekstrem dengan pembebanan siklik yang memicu akumulasi tegangan dan memperbesar potensi kegagalan akibat kelelahan. Faktor utama yang memengaruhi umur kelelahan meliputi desain geometri dan sifat material [7]. Oleh karena itu, diperlukan analisis menyeluruh terhadap desain dan material *ring dies* untuk memastikan umur pakai yang optimal, meningkatkan efisiensi produksi, serta menurunkan biaya pemeliharaan dan penggantian [7]. Material 42CrMo4 merupakan baja paduan dengan kekuatan tinggi, ketahanan aus, dan ketangguhan yang baik, menjadikannya kandidat ideal untuk aplikasi dengan beban dinamis tinggi [8].

Studi kasus penelitian yang dilakukan oleh He-Da Bai, dkk., menunjukkan bahwa dinding bagian dalam *ring dies* merupakan bagian yang paling parah keausannya melalui inspeksi visual. Temuan tersebut dikonfirmasi lebih lanjut melalui analisis morfologi mikroskopis pada permukaan yang aus [9]. Berdasarkan penelitian J. Chojnacki, dkk., dengan menggunakan studi simulasi Metode Elemen Hingga (MEH) pada *flat dies* memperlihatkan konsentrasi tegangan tertinggi terjadi di dekat tepi lubang, sedangkan distribusi tekanan menunjukkan tekanan tertinggi berada di zona interaksi antara material pelet dan permukaan *flat dies*. Analisis kelelahan dilakukan dengan pendekatan beban siklik *sinusoidal*, yang secara teoritis merepresentasikan kondisi kerja aktual pada sistem pembebanan berulang. Studi tersebut memperkirakan bahwa jumlah minimum siklus pembebanan sebelum kegagalan kelelahan adalah 2.144×10^6 siklus [10].

Dari penjelasan di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi desain *ring dies* terhadap umur kelelahan material 42CrMo4 pada mesin produksi *wood pellet*, serta mengevaluasi dampak perubahan tekanan pembebanan terhadap distribusi tegangan dan umur kelelahan tersebut. Simulasi dilakukan menggunakan pendekatan MEH dengan variasi desain *ring dies single pad*, *double pad*, dan *half pad*, serta variasi pembebanan yaitu 100 MPa, 135 MPa, dan 150 MPa. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan teknis bagi pengembangan desain *ring dies* yang lebih andal di industri *wood pellet*.

2. Metodologi

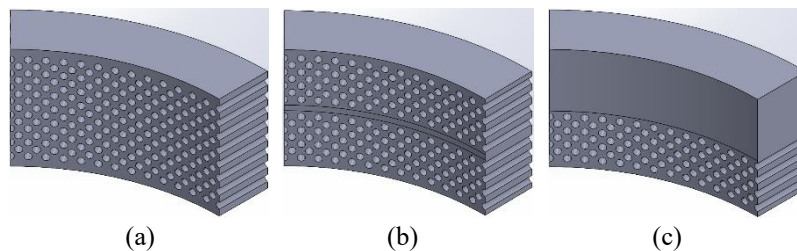
Metodologi dalam penelitian ini bersifat evaluasi untuk mengetahui perbandingan pada variasi desain *ring dies* terhadap variasi pembebanan. Proses penelitian dilaksanakan di Laboratorium Komputer Jurusan Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Tidar. Penelitian ini dilaksanakan pada tahun ajaran 2024/2025 dilakukan selama 6 (enam) bulan. Hal ini meliputi pengambilan data, analisis data, hingga penyusunan proposal yang dilakukan dari bulan Desember 2024 sampai dengan bulan Mei 2025. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Variasi desain *ring dies*

Tiga desain geometri *ring dies* yang dianalisis dalam penelitian ini terdiri dari desain *single pad*, *double pad*, dan *half pad*. Ketiganya dimodelkan secara 3D menggunakan perangkat lunak SolidWorks dan kemudian dimasukkan ke Ansys Workbench untuk proses simulasi [11]. Pemilihan desain ini didasarkan pada observasi visual dari praktik industri pada video dokumentasi proses *pelletizing* dan produk-produk *ring dies* yang tersedia pada *website* produsen *ring dies*. Perbedaan utama dari ketiga desain ini terletak pada konfigurasi bantalan (*pad*) di bagian dalam *ring dies*, desain *single pad* memiliki satu bantalan utama, *double pad* membagi bantalan menjadi dua bagian asimetris, dan *half pad* memiliki setengah dari bantalan *single pad*. Model geometri yang telah dibuat di perangkat *Computer Aided Design* (CAD) perlu melalui tahap penyederhanaan. Langkah penyederhanaan desain ini penting karena fitur geometri kecil seperti *chamfer*, *fillet*, dan detail non-struktural dapat memperberat proses *meshing*, serta memperpanjang waktu komputasi tanpa memberikan pengaruh besar terhadap hasil akhir simulasi. Penyederhanaan model merupakan praktik yang umum dilakukan dalam simulasi MEH untuk menjaga efisiensi tanpa mengorbankan akurasi [12]. Desain yang telah disederhanakan dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Penyederhanaan desain *ring dies* (a) *Single pad* (b) *Double pad* (c) *Half pad*

Material

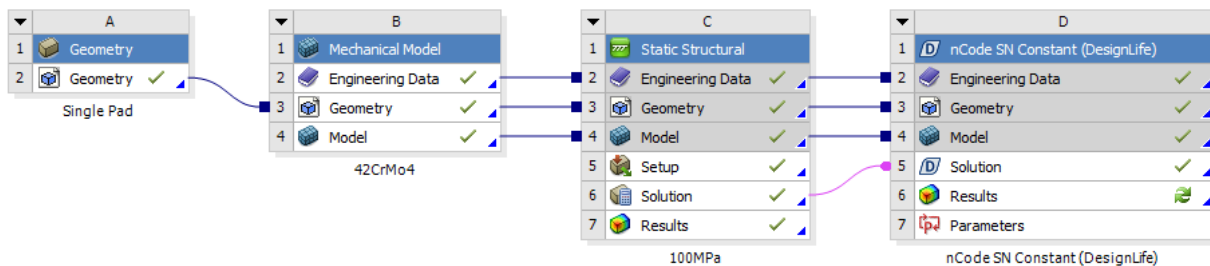
Material yang digunakan dalam simulasi adalah 42CrMo4, yaitu baja paduan rendah yang sering digunakan untuk komponen mesin yang memerlukan ketahanan tinggi terhadap kelelahan dan keausan [13]. Nilai-nilai parameter mekanik utama seperti *density*, *poisson ratio*, dan *shear modulus* ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. *Material properties* 42CrMo4 [8]

No	Material	Density (Kg/m ³)	Poisson ratio	Shear modulus (MPa)
1	42CrMo4	7850	0.3	8×10^4

Alur proses simulasi

Simulasi statik dilakukan menggunakan *software* Ansys Workbench untuk memperoleh distribusi tegangan *von mises stress* pada variasi desain *ring dies*. Tekanan pembebanan diberikan pada permukaan dalam *ring dies*, dengan tiga variasi 100 MPa, 135 MPa, dan 150 MPa. Tekanan pembebanan sebesar 100 MPa, 135 MPa, dan 150 MPa dipilih untuk mencerminkan rentang tekanan yang umum terjadi dalam proses *pelletizing* menggunakan *ring dies*. Nilai 150 MPa dijadikan batas atas karena merujuk pada penelitian Mushiri, dkk., yang menyatakan bahwa tekanan maksimum yang mungkin terjadi akibat gaya putar roller tidak melebihi 150 MPa [4]. Selanjutnya, data tegangan hasil simulasi statik digunakan sebagai input untuk simulasi kelelahan dengan metode *stress-life* (S-N) dan pembebanan siklus *zero based*. Alur proses simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.



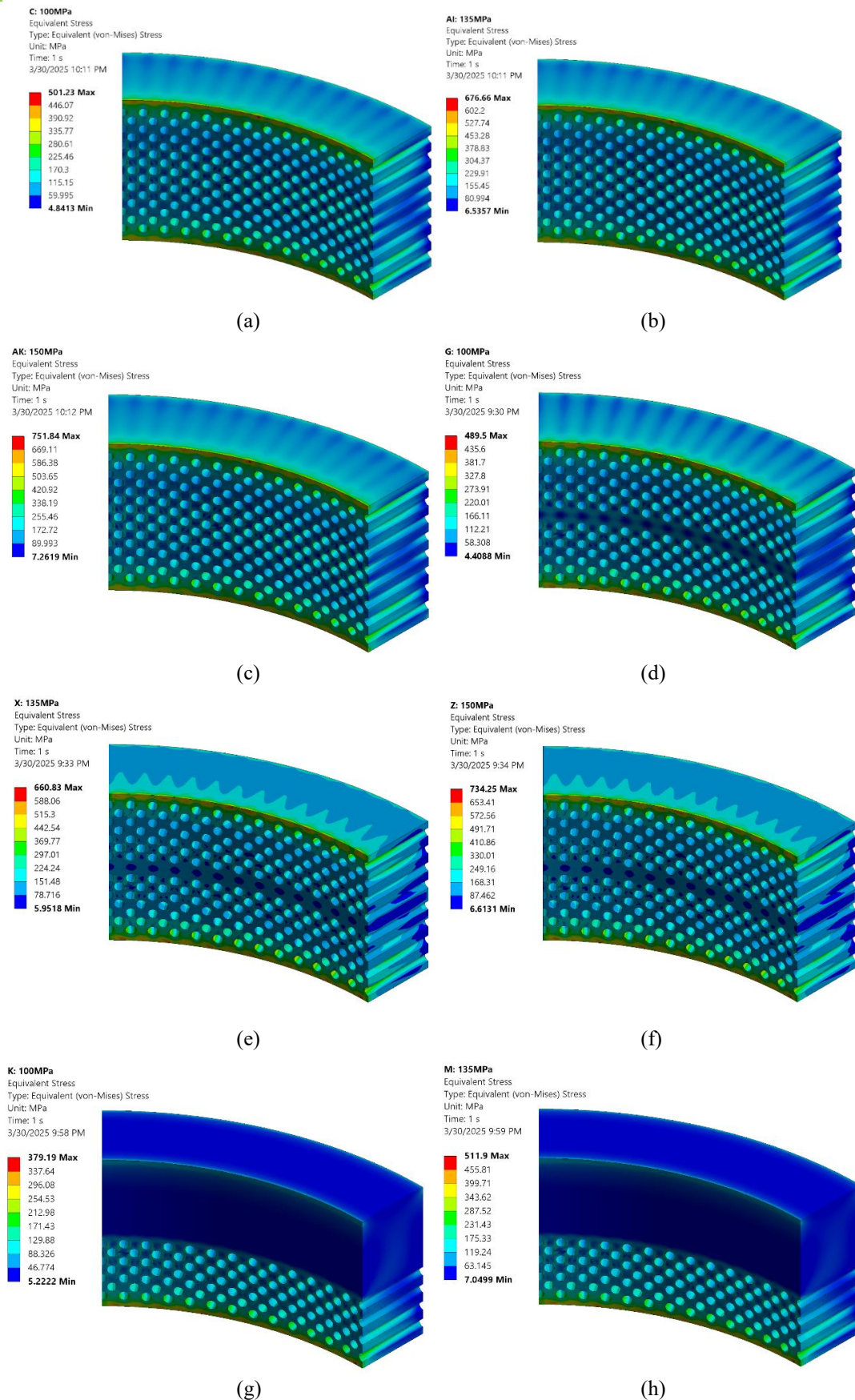
Gambar 3. Alur proses simulasi

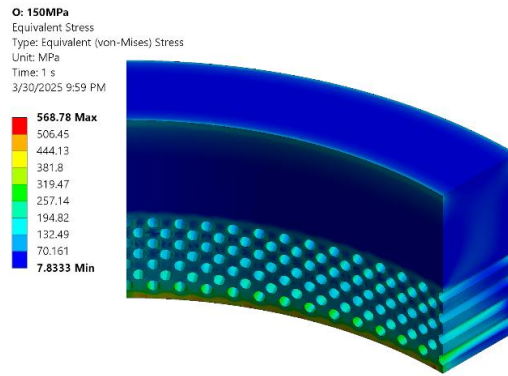
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil simulasi statik

Hasil simulasi statik menunjukkan bahwa ketiga variasi desain *ring dies* memberikan distribusi tegangan *von mises stress* yang berbeda. Desain *half pad* menghasilkan distribusi tegangan yang lebih rendah dibandingkan desain lainnya. Sebaliknya, desain *single pad* menunjukkan adanya konsentrasi tegangan tinggi pada beberapa titik kritis yang berpotensi menjadi titik awal kegagalan kelelahan. Distribusi tegangan yang rendah pada desain

half pad disebabkan oleh konfigurasi geometrinya yang lebih sedikit area berlubang. Kondisi ini mengurangi kemungkinan terjadinya konsentrasi tegangan lokal yang bisa menjadi inisiasi retakan. Hasil simulasi statik dapat dilihat pada Gambar 4.



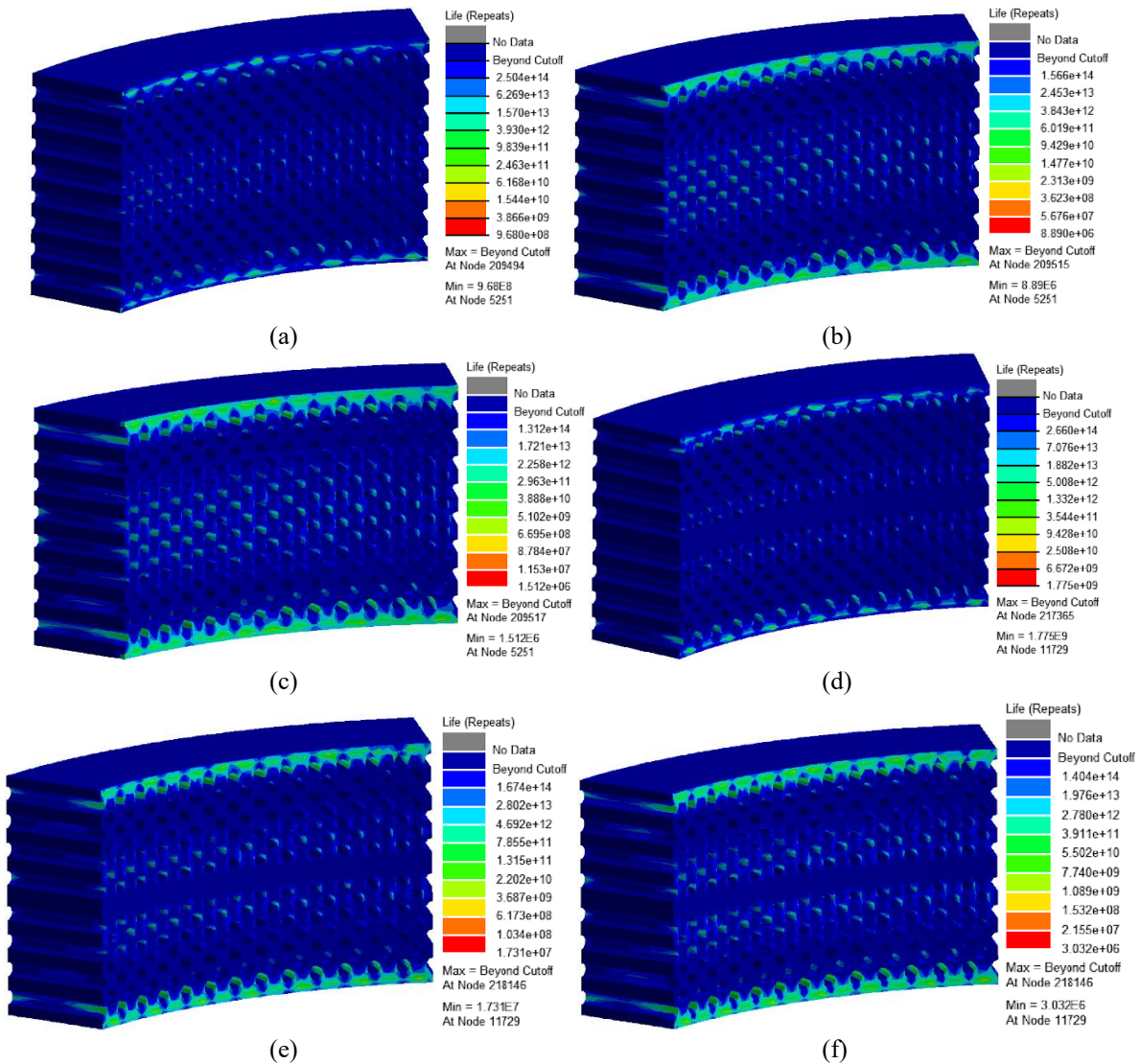


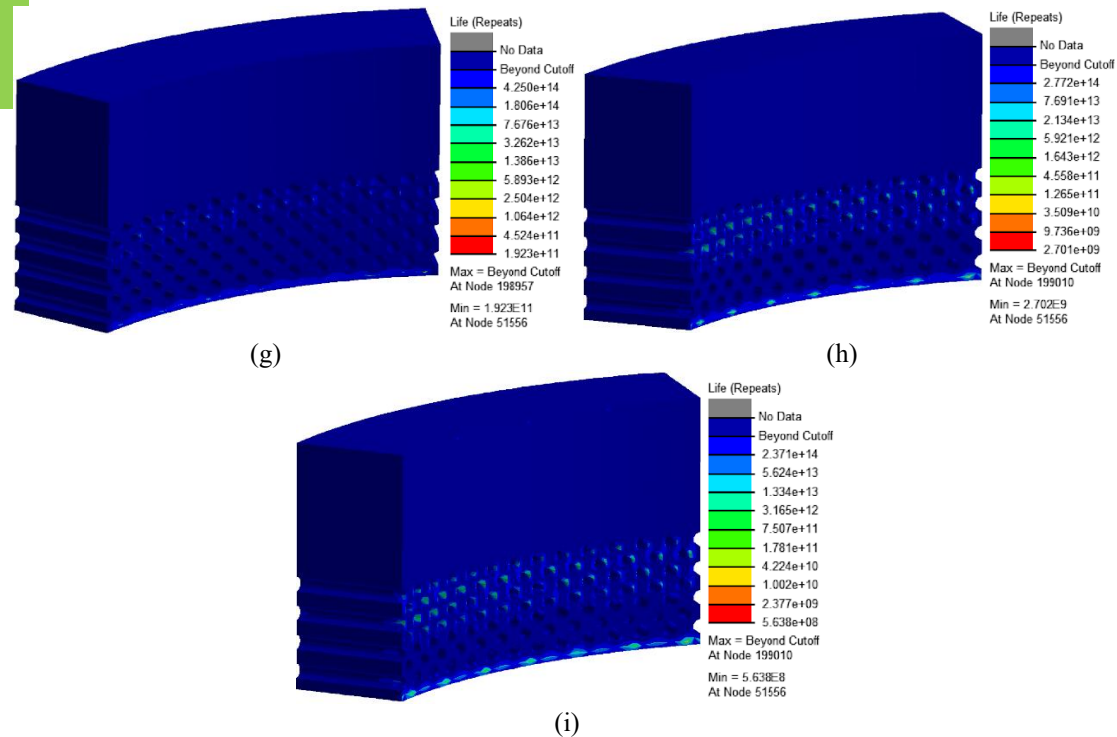
(i)

Gambar 4. Tegangan *von mises stress* pada variasi desain ring dies dengan material 42CrMo4 (a) *Single pad* 100 MPa (b) *Single pad* 135 MPa (c) *Single pad* 150 MPa (d) *Double pad* 100 MPa (e) *Double pad* 135 MPa (f) *Double pad* 150 MPa (g) *Half pad* 100 MPa (h) *Half pad* 135 MPa (i) *Half pad* 150 MPa

Hasil simulasi kelelahan

Simulasi kelelahan dilakukan menggunakan data tegangan hasil dari simulasi statik. Kriteria *stress-life* (S-N curve) digunakan untuk memperkirakan umur kelelahan pada masing-masing desain [14]. Hasil simulasi kelelahan disajikan pada Gambar 5.





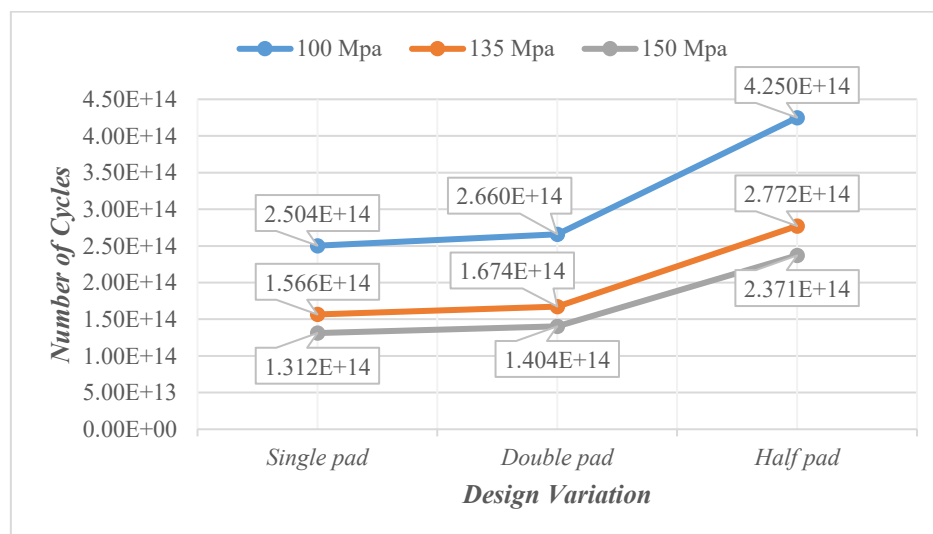
Gambar 5. Umur kelelahan pada variasi desain ring dies dengan material 42CrMo4 (a) *Single pad* 100 MPa (b) *Single pad* 135 MPa (c) *Single pad* 150 MPa (d) *Double pad* 100 MPa (e) *Double pad* 135 MPa (f) *Double pad* 150 MPa (g) *Half pad* 100 MPa (h) *Half pad* 135 MPa (i) *Half pad* 150 MPa

Estimasi umur kelelahan untuk masing-masing konfigurasi desain ring dies pada variasi tekanan pembebanan disajikan secara kuantitatif dalam Tabel 2 untuk memudahkan dalam membandingkan hasil Umur kelelahan pada setiap variasi desain.

Tabel 2. Estimasi umur kelelahan (siklus) berdasarkan variasi desain dan tekanan pembebanan.

<i>Tekanan (MPa)</i>	<i>Single pad</i>	<i>Double pad</i>	<i>Half pad</i>
100	2.504×10^{14}	2.660×10^{14}	4.250×10^{14}
135	1.566×10^{14}	1.674×10^{14}	2.772×10^{14}
150	1.312×10^{14}	1.404×10^{14}	2.371×10^{14}

Untuk memperjelas pola hubungan antara desain geometri dan tekanan pembebanan terhadap umur kelelahan, data pada Tabel 2 divisualisasikan dalam bentuk Grafik perbandingan (Gambar 6) yang menunjukkan tren peningkatan umur kelelahan pada desain *half pad* di semua tingkat tekanan.



Gambar 6. Grafik hasil simulasi kelelahan *ring dies*

Dari Gambar 6 terlihat bahwa desain *half pad* memberikan umur kelelahan tertinggi pada semua tingkat tekanan pembebanan. Umur kelelahan tertinggi dicapai pada desain *half pad* dengan tekanan 100 MPa sebesar 4.250×10^{14} siklus, nilai ini lebih tinggi dibandingkan desain *double pad* dan *single pad*. Penurunan tekanan menyebabkan distribusi tegangan lebih merata, sehingga memperpanjang umur komponen. Sebaliknya, peningkatan tekanan pembebanan menyebabkan intensitas tegangan maksimum meningkat secara signifikan, yang mempercepat inisiasi serta propagasi retakan akibat beban siklik. Desain *single pad* menunjukkan performa terendah, yang menandakan bahwa desain ini tidak optimal dalam mengelola beban siklik tinggi.

Area berlubang pada ring dies merupakan titik masuk beban tekanan dari sisi internal [15]. Desain dengan lebih sedikit area berlubang (*half pad*) mengurangi risiko konsentrasi tegangan lokal di sekitar lubang-lubang tersebut. Hal ini sejalan dengan prinsip *stress concentration* yang dijelaskan pada buku Shigley's Mechanical Engineering Design, bahwa perubahan geometri tajam seperti lubang memperbesar tegangan lokal dan mempercepat inisiasi retak [16]. Secara umum, penggunaan material 42CrMo4 dalam kombinasi dengan desain geometri yang tepat terbukti memberikan ketahanan kelelahan yang baik. Menurut Calik, A., 42CrMo4 dikenal memiliki sifat *toughness* dan *fatigue strength* yang lebih baik berkat struktur mikro bainit/tempered martensite setelah perlakuan panas [17].

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini sejalan dengan temuan Chojnacki yang menunjukkan bahwa konsentrasi tegangan tertinggi pada cetakan *flat dies* terjadi di area sekitar lubang, yang juga menjadi lokasi utama inisiasi retak akibat pembebanan siklik. Namun, berbeda dengan studi Chojnacki yang hanya menggunakan satu konfigurasi desain cetakan datar dengan asumsi tekanan kontak tetap, penelitian ini mengevaluasi secara komprehensif pengaruh variasi desain geometri (*single pad*, *double pad*, dan *half pad*) serta tiga tingkat tekanan pembebanan. Estimasi umur kelelahan yang dilaporkan dalam studi ini menunjukkan hasil yang secara signifikan lebih tinggi, mencapai 4.25×10^{14} siklus untuk desain *half pad* pada tekanan 100 MPa, dibandingkan dengan 2.14×10^6 siklus yang dilaporkan oleh Chojnacki. Perbedaan signifikan ini mengindikasikan bahwa pemilihan material 42CrMo4, yang memiliki karakteristik ketahanan kelelahan tinggi, berperan krusial dalam meningkatkan durabilitas komponen terhadap beban siklik. Dengan demikian, pendekatan desain dan material yang diusulkan dalam studi ini terbukti lebih unggul dalam memperpanjang masa pakai *ring dies* pada mesin *wood pellet*. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa metode simulasi berbasis MEH efektif digunakan untuk mengevaluasi dan memprediksi umur kelelahan komponen mesin produksi *wood pellet*.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi desain geometris *ring dies* dan tekanan pembebanan memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan dan umur kelelahan material 42CrMo4. Melalui simulasi statik dan kelelahan berbasis MEH, ditemukan bahwa desain *half pad* memberikan distribusi tegangan yang paling rendah dan umur kelelahan tertinggi di seluruh variasi tekanan, menjadikannya pilihan desain paling optimal untuk meningkatkan ketahanan komponen terhadap beban siklik. Sebaliknya, desain *single pad* menghasilkan konsentrasi tegangan tertinggi dan umur kelelahan terendah serta menunjukkan performa struktural yang paling rendah terhadap pembebanan siklik. Selain itu, peningkatan tekanan pembebanan terbukti mempercepat penurunan umur kelelahan akibat tingginya tegangan maksimum yang muncul. Secara keseluruhan, kombinasi penggunaan material 42CrMo4 dengan desain *half pad* terbukti efektif untuk memperpanjang masa pakai *ring dies* pada mesin produksi *wood pellet*.

Daftar Pustaka

- [1] V. J. Shardul, A. M. Kulkarni, and A. S. Dayma, "Design, Fabrication of Solar Operated Biomass Pelletizing Machine and Study of Biomass Pellet Samples," vol. 05, no. 07, 2018.
- [2] J. C. Paredes-Rojas, C. R. Torres San Miguel, A. I. Flores Vela, B. Bravo-Díaz, C. De La Cruz Alejo, and D. P. Ramírez, "Design Proposal of a Prototype for Sawdust Pellet Manufacturing through Simulation," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020, no. 1, p. 9565394, Jan. 2020, doi: 10.1155/2020/9565394.
- [3] M. Segerström and S. H. Larsson, "Clarifying sub-processes in continuous ring die pelletizing through die temperature control," *Fuel Processing Technology*, vol. 123, pp. 122–126, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.02.008.
- [4] T. Mushiri, P. Mugodo, and C. Mbohwa, "Design of a sawdust pelleting machine," presented at the Industrial Engineering and Operations Management, Rabat, Morocco, 2017.
- [5] Miloš Matuš, Peter Križan, Ľubomír Šooš, and Viliam Veteška, "Design of pressing tools for pelleting machines," *World J. Adv. Eng. Tech. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 052–062, Dec. 2021, doi: 10.30574/wjaets.2021.4.1.0086.
- [6] Miloš Matuš, Peter Križan, and Juraj Beniák And Stanislav Strigáč, "Pelleting dies – design, material, geometry of pressing channels," *World J. Adv. Eng. Technol. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 287–295, Dec. 2022, doi: 10.30574/wjaets.2022.7.2.0181.

- [7] S. K. Nielsen and M. Mandø, "Experimental and numerical investigation of die designs in biomass pelleting and the effect on layer formation in pellets," *Biosystems Engineering*, vol. 198, pp. 185–197, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.010.
- [8] A. Zhao, T. Liu, X. De, B. Zhang, and X. Lv, "Optimization design of key parameters of forming parts of an involute plunger type biomass ring die pelletizing machine by DEM-FEM coupled modeling," *BioRes*, vol. 18, no. 4, pp. 8120–8133, Oct. 2023, doi: 10.15376/biores.18.4.8120-8133.
- [9] H. Bai, B. Zheng, W. Li, and X. Tu, "Failure analysis of ring die of a feed pellet machine," *China Foundry*, vol. 17, no. 2, pp. 167–172, Mar. 2020, doi: 10.1007/s41230-020-9104-8.
- [10] J. Chojnacki, P. Kaldunski, S. Nagnajewicz, and R. Patyk, "Simulation tests of pelleting process in aspect of obtained stresses, contact pressure and fatigue strength for granulator flat die," presented at the Engineering Mechanics 2018, May 2018, pp. 157–160. doi: 10.21495/91-8-157.
- [11] Fuad Hilmy, *Buku Ajar Metode Elemen Hingga*. Pustaka Rumah C1nta, 2021.
- [12] D. Madier, *Practical finite element analysis for mechanical engineers*, First edition. Les Cedres, Quebec: FEA Academy, 2020.
- [13] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering*. New York: Wiley, 2019.
- [14] RLD Ltd, N. Bishop, and F. Sherratt, *Finite Element Based Fatigue Calculations*. NAFEMS, 2000. doi: 10.59972/ta5h05jd.
- [15] Shi Shuijuan, Wu Kai, Peng Binbin, Wang Shuanhu, and Sun Yu, "Mechanical model and FEA of ring die of three-roller pellet mill," in *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Wuhan, China: IEEE, Jun. 2010, pp. 76–80. doi: 10.1109/MACE.2010.5535988.
- [16] R. G. Budynas, K. J. Nisbett, J. K. Nisbett, and J. E. Shigley, *Shigley's mechanical engineering design*, 10. ed. in SI units. in McGraw-Hill series in mechanical engineering. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.
- [17] A. Çalık, O. Dokuzlar, and N. Uçar, "The effect of heat treatment on mechanical properties of 42CrMo4 steel," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 1, no. 98, pp. 5–10, Jan. 2020, doi: 10.5604/01.3001.0014.0811.