

Pengembangan Gear dengan Proses Additive Manufacturing berbasis Lattice Structure dengan Dimensi Variasional

Vynna Alviolina Indriyana^{a,1}, Gandjar Kiswanto^{a,2}, Ridho Irwansyah^{a,3}

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 16424

¹vynnalviolo@gmail.com, ²gandjar.kiswanto@ui.ac.id, ³ridho.irwansyah@ui.ac.id

Abstract. Gears are fundamental components in mechanical systems, where reducing weight without compromising strength is a key engineering challenge. This study introduces a multi-material gear with a lattice structure fabricated by Additive Manufacturing (AM). The design integrates an outer gear of Ti-6Al-4V for high strength and wear resistance with an inner gear of 316L stainless steel for structural support. Weight reduction was achieved by generating a diamond wire cube lattice with variable strut diameters, optimized using stress distribution data from finite element analysis and clustering with the K-means algorithm. Structural analysis through ANSYS Explicit Dynamics and fatigue simulations confirmed that stresses remained below the ultimate tensile strength of both materials, ensuring reliable service life. Thermal analysis with CFD indicated a maximum operating temperature of 64.1 °C, within the typical gear range of 50–140 °C. The proposed design reduces gear mass by 34.8% compared to a solid model, demonstrating the feasibility of multi-material AM with lattice optimization for lightweight and durable gear applications.

Keywords: Gear, multi-material, Additive Manufacturing, lattice

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/rpb15d50>

PENDAHULUAN

Gear adalah komponen mendasar dalam mesin dan sistem mekanis. *Gear* digunakan untuk mengubah kecepatan, arah, dan besarnya sumber daya. *Gear* berperan penting di bidang teknik mesin, berfungsi sebagai elemen signifikan dalam sistem kontrol gerak dan gaya. Dengan memvariasikan ukuran dan spesifikasi *gear*, kecepatan, daya, atau torsi dapat dioptimalkan sesuai dengan kebutuhan sistem.

Tren manufaktur saat ini adalah membuat objek yang dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan perancang. Teknologi *additive manufacturing* (AM) memungkinkan fabrikasi bentuk atau struktur apa pun dari model 3D digital. 3D AM dapat mengurangi biaya yang sering dikaitkan dengan pengembangan produk[1]. Penggunaan AM dalam inovasi produk dapat menurunkan lead time hingga 90% dan biaya produksi hingga 70%[2]. AM memungkinkan untuk memproduksi benda berukuran kecil [3] dan geometri kompleks dengan toleransi tinggi[4].

Karakteristik mekanis struktur *lattice* AM bergantung pada sifat-sifat material. Beragam material logam telah diproses melalui pencetakan 3D logam, di antaranya logam murni (emas, tembaga, niobium, tantalum, titanium), bubuk alloy (berbasis aluminium, kobalt, tembaga, besi, nikel, dan paduan material (tembaga, besi, dan material lainnya seperti Ni-Al, Ti-Ni, Ti-Mo, dan Ti-V)[5]. Dalam kategori paduan titanium, jenis paduan yang banyak digunakan adalah Ti-6Al-4V[6].

Struktur *lattice* dapat diaplikasikan ke bermacam-macam desain (kedirgantaraan, teknik biologi, teknik mesin, aplikasi militer, sistem energi terbarukan,

perangkat kesehatan, dll. [7]) karena sifat-sifat yang sangat baik termasuk ringan, kekuatan spesifik tinggi dan kekakuan menghilangkan panas, dan sebagainya[8].

Teknologi AM memungkinkan untuk membuat struktur *lattice* karena membangun objek lapis demi lapis, memungkinkan fabrikasi geometri yang kompleks dan ringan yang sulit atau tidak mungkin diproduksi menggunakan metode manufaktur tradisional[9]. *Lattice* merupakan pola struktur yang diulang secara teratur ke segala arah. Pola ini dikenal sebagai *unit sel*. Karena bentuk unit sel tidak solid, struktur *lattice* memiliki massa per volume yang lebih sedikit daripada bagian padat[10].

Strategi lebih lanjut untuk mengonfigurasi struktur AM adalah gradien fungsional yang secara bertahap mengubah nilai *parametrik* secara spasial melalui efisiensi *lattice* dan bergantung pada geometri[11]. Struktur *lattice* dapat dibuat dari susunan sel satuan menggunakan (1) pola langsung, di mana sel satuan diulang secara translasi, (2) pola *konformal*, di mana sel satuan diulang sesuai dengan geometri permukaan tertentu, dan (3) *pengoptimalan topologi*, yang dapat digunakan untuk tidak hanya mengoptimalkan distribusi material dalam satu unit sel, tetapi juga mengatur replikasi spasial unit sel melalui seluruh ruang desain [12]. Material *lattice* biasanya terbuat dari unit sel struktur mikro yang disusun secara berkala dalam ruang tiga dimensi sesuai dengan aturan tertentu [13]. Unit sel umumnya dirancang sebagai elemen. Kemudian struktur *lattice* dapat langsung dibuat dengan mengulangi unit sel dalam tiga dimensi (di sepanjang sumbu x, y, dan z).

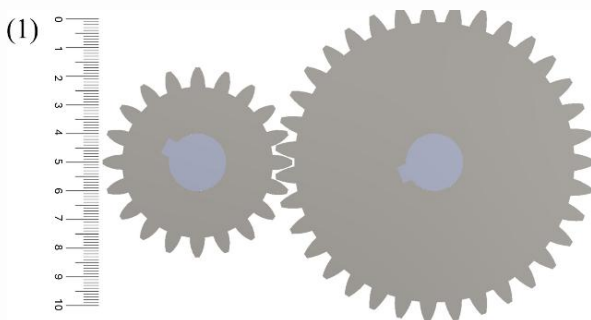
Mengubah ukuran sel *lattice* pada volume konstan memengaruhi kekuatan struktur. Selain itu, perubahan dimensi cell *lattice* pada sumbu x, y, z dan pembebanan pada *lattice* mempengaruhi deformasi dan tegangan [14]. Dengan menerapkan pendekatan variabel diameter *strut*, struktur dapat terhindar dari kegagalan struktur dan transfer gaya melintang antar sel lebih halus [15]. Bentuk *lattice* dapat direkayasa untuk mencapai berbagai fungsionalitas dan karakteristik, dengan memvariasikan parameter desain seperti ukuran sel, panjang *strut*, dan diameter *strut* sel satuan dalam struktur *lattice*.

Sebelumnya, penelitian AM Ti-6Al-4V *lattice gear* menggunakan SLM (*Selective Laser Melting*) telah dilakukan. Dengan memanfaatkan pengoptimalan topologi menggunakan *software* ProTop, volume *gear* terstruktur *lattice* yang dioptimalkan berkurang hingga 30% [16]. Penelitian ini memiliki tujuan yang sama, yaitu pembuatan desain untuk membuat *gear* dengan berat minimal.

Pengurangan berat distrategikan dalam struktur *lattice*. Kondisi tegangan pada gigi *gear* berkaitan dengan gaya normal gigi yang bekerja pada kontak *gear* [17]. Gaya normal gigi ini menyebabkan tegangan kontak pada *flank gear* dan tegangan lentur terutama pada akar *fillet gear*. Oleh karena itu, *gear* harus memiliki material yang memadai untuk menahan tekanan. Akibatnya, *gear* dirancang sebagai dua bagian dengan material yang bervariasi. Material luar memiliki sifat mekanik yang lebih tinggi untuk mentransmisikan torsi ke *gear* yang sesuai [18].

METODOLOGI

Desain Gear Multi Material

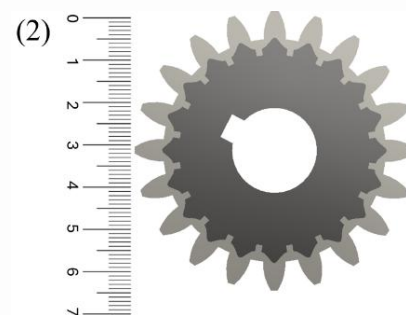


Gbr. 1 Assembly Solid Gear

Untuk mempertahankan rasio kecepatan sudut yang konstan, bentuk gigi didesain sedemikian rupa sehingga titik kontak antara dua gigi selalu sama [19]. Terdapat dua *gear* yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu *driving gear*, yang merupakan fokus penelitian, dan *driven gear*. Kedua *gear* memiliki parameter desain modul 3 mm, sudut tekanan 20°, lebar 15 mm, diameter poros 20 mm, dan 1 kunci.

Namun, jumlah gigi di antara kedua *gear* berbeda, *driving gear* memiliki 20 gigi, dan *driven gear* memiliki 35 gigi. *Assembly* masing-masing *gear* ditunjukkan pada Gambar 1.

Driving gear terbagi menjadi dua bagian dan disebut sebagai *gear* multi-material yang terdiri dari dua geometri, *outer gear* dan *inner gear*. Untuk bagian dua material. Model geometris untuk kedua material dibuat satu persatu untuk dimasukkan ke dalam *software* 3D printing [20]. Desain *inner gear* dan *outer gear* dirancang dengan memposisikan titik-titik pada sudut dan jarak tertentu dari pusat *gear*, kemudian membuat pola melingkar pada titik, dan akhirnya menghubungkannya dengan *spline*. Garis *spline* akan menjadi pembatas antara *inner gear* dan *outer gear*. Desain paling optimal terdiri dari garis *spline* yang dibuat dengan titik pada 24 mm pada 0°, 24,5 mm pada 4°, dan 26,5 mm pada 9°. Untuk memastikan bahwa *inner gear* dan *outer gear* berputar secara simultan, ditambahkan bentuk mirip *kunci* pada jarak 23 mm dari pusat dan lebar 1,5 mm pada garis *spline*. Desain multi-material *gear* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gbr. 2 Gear Multi Material

Material yang digunakan untuk *gear* multi-material adalah 316 stainless steel untuk *inner gear* dan Ti-6Al-4V untuk *outer gear*. Walaupun kedua material memiliki kapasitas pengerasan yang sama, tetapi laju pengerasan 316L *Stainless Steel* lebih cepat [21].

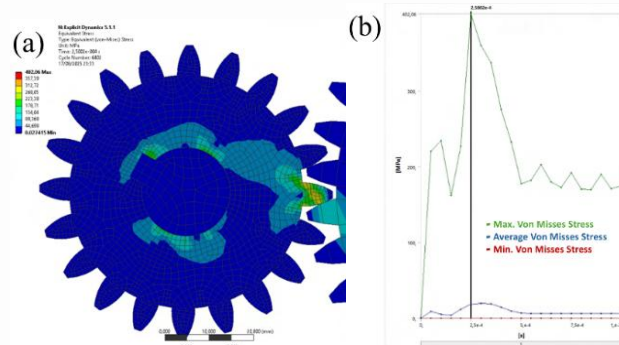
316L *stainless steel* dapat diproduksi dengan beberapa metode AM dan memiliki sifat mekanik masing-masing. Metode SLM menghasilkan 316L *Stainless Steel* dengan kekuatan 207 MPa YS, dan 539 MPa UTS [22]. Selanjutnya, pembuatan 316 *stainless steel* dilakukan dengan metode SLM dengan geometri dasar dalam bidang dan sudut horizontal yang berbeda. UTS tertinggi 691 MPa dapat dicapai dengan mencetak dalam bidang XY dan sudut 30° terhadap garis horizontal [23].

Teknologi AM yang tersedia secara komersial yang digunakan untuk paduan Ti-6Al-4V dapat dikategorikan menjadi 4 jenis: *Electron beam-based PBF*, *Laser-based PBF*, *Directed energy deposition*, *Sheet lamination* [24]. Metode PBF mampu menghasilkan objek dengan kualitas mekanik yang

unggul dan bentuk yang rumit dengan presisi tinggi (0,02 mm). Dibandingkan dengan teknologi *powder bed-based* AM, metode *wire arc* AM, *laser metal wire deposition* dan *laser melting* memanfaatkan arc atau laser [25]. Sifat mekanik tertinggi 1143 ± 30 MPa YS dan 1269 ± 9 MPa UTS dari Ti-6Al-4V dapat diraih dengan metode PBS pada sistem EOS M270 dalam orientasi longitudinal [26].

Analisis Tegangan

Analisis tegangan dilakukan dalam *software* Ansys, khususnya analisis *Explicit Dynamics*. Material yang ditugaskan untuk komponen adalah baja untuk *driven gear*, *shaft*, dan *key*; AM 316 stainless steel untuk *inner gear*, dan AM Ti-6Al-4V untuk *outer gear*. Semua sifat material diambil dari *Ansys Engineering Data Sources*. *Constraint* untuk analisis ini adalah *remote displacement* pada permukaan bagian dalam *driven gear* dengan nilai 0 pada komponen X, Y, Z dan rotasi sumbu X, Y. Sementara itu, rotasi sumbu Z diatur sebagai bebas untuk memungkinkan rotasi. Beban disimulasikan sebagai kecepatan rotasi dari poros *driving gear* 1000 rpm atau setara dengan 105 rad/s. *Output* dari analisis ini adalah tegangan von Mises sebagai basis data untuk mengelompokkan elemen *lattice*. Tegangan tertinggi terjadi pada *flank* gigi, ditunjukkan pada distribusi tegangan Von Mises (gbr. 3a), dan terjadi saat *driving gear* kontak dengan *driven gear* (gbr. 3b).



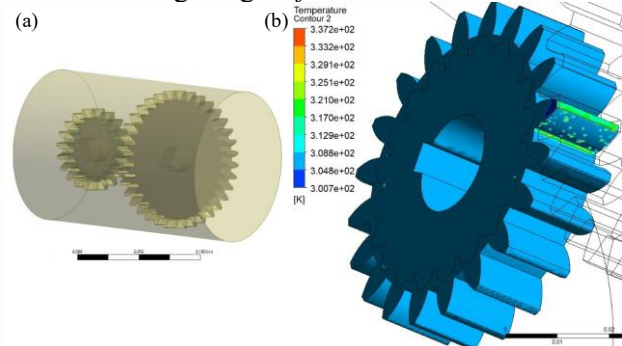
Gbr. 3 (a) Distribusi dan (b) Grafik *Von Mises Stress*

Selain itu, analisis *fatigue* ANSYS juga dilakukan untuk memastikan *gear* multi-material masih berfungsi

dalam masa pakai 10 tahun. Parameter yang dimasukkan ke dalam analisis adalah tipe *Zero Based Loading*, faktor kekuatan *fatigue* 1, faktor skala 1, *Goodman criterion*, komponen tegangan ekuivalen (Von Mises). Hasil analisis kelelahan ditunjukkan pada Tabel 1.

Analisis Termal

Analisis termal dilakukan dengan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) melalui Ansys Fluent. *Assembly gear* dimasukkan ke dalam *fluid enclosure* seperti pada Gbr. 4a. Langkah sebelum analisis adalah membuat *section inlet* dan *outlet* pada *enclosure* serta *friction wall* pada gigi *gear* yang bersentuhan. Kemudian, pada *Fluent meshing*, *assembly gear* diatur sebagai *region solid* dan *enclosure* sebagai *region fluid*.



Gbr. 4 (a) Assembly Gear dalam Enclosure (b) Distribusi Temperatur

Pada pengaturan *fluid flow*, metode yang digunakan adalah *energy: on* dan *viscous: transition k-kl omega*. Setelah itu, material gear disesuaikan seperti pada analisis sebelumnya, sedangkan material *enclosure* adalah *engine oil*. Pada seluruh *solid cell zone* ditambahkan parameter *solid motion* rotasi sebesar 105 rad/s. Semua kondisi *boundary condition* termal dibuat menjadi *coupled* kecuali pada *friction wall*, ditambahkan *heat flux* sebesar 43.615 W/m² yang didapatkan dari kalkulasi gaya friksi dengan koefisien friksi 0.15 dan persentase kontak *flange* gigi 30%. Pada termal fluid ditambahkan konveksi dengan *heat transfer coefficient* 2839 W/m²K[27]. Hasil analisis termal berupa distribusi temperatur pada Gbr. 5.

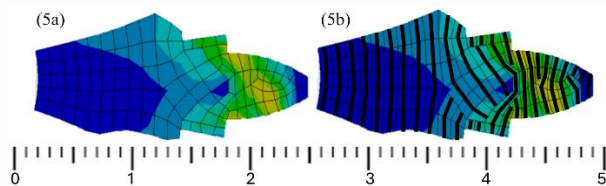
Tabel 1. Analisis *Fatigue Gear* Multi Material

Bagian	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	S_e' (MPa)	S_e (MPa)	n_s
Outer	493.38	0	246.69	246.69	634.5	369.66	1.16
Inner	223.3	0	111.65	111.65	345.5	208.25	1.43

K-Means Clustering

K-means Clustering adalah algoritma pembagian kluster berbasis *centroid* dan menggunakan rata-rata untuk mewakili *centroid* kluster[28]. Algoritma K-Means mudah diterapkan dan efisien secara komputasi[29]. Saat ukuran data besar, algoritma K-Means lebih cepat daripada algoritma lainnya dan menghasilkan kluster berkualitas[30].

Input data untuk algoritma *K-means* adalah koordinat X, Y, Z dan nilai tegangan dari setiap *node* tegangan pada *inner gear* dan *outer gear* pada *partial gear* yang berupa gigi dengan tegangan tertinggi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(a). Arah orientasi dibuat linear dengan arah tegangan sehingga dapat menahan tegangan dengan lebih baik. Dengan demikian, orientasi setiap *lattice* harus dipetakan terlebih dahulu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(b). Penelitian sebelumnya mengenai jumlah kluster gradient *lattice* dengan safety factor yang dilakukan oleh penulis menemukan bahwa jumlah kluster optimal dengan integritas struktural terbaik adalah 3 dan 4 kluster. *Inner gear* dibagi menjadi 3 kluster dan *outer gear* dibagi menjadi 4 kluster.



Gbr. 5 (a) *Partial Gear* (b) *Orientasi Lattice*

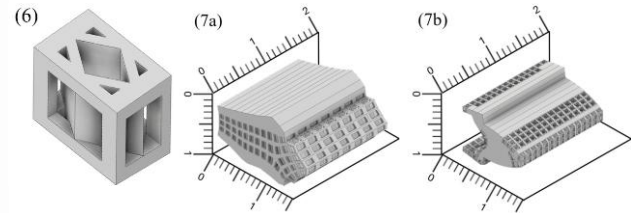
Generasi Lattice Structure

Geometri *lattice* yang digunakan dalam desain ini adalah *diamond wire cube lattice* yang dihasilkan dengan memasukkan koordinat ke dalam program API Autodesk Inventor. Geometri *lattice* tersebut ditunjukkan pada Gbr. 6. Langkah-langkah untuk membuat *diamond wire cube lattice* adalah:

1. Buat 8 Titik 3D di setiap sudut *lattice*,
2. Buat permukaan bawah dan atas lalu terapkan fitur *add loft* untuk membuat Hex8,
3. Buat permukaan bawah dan atas, depan dan belakang, kiri dan kanan yang lebih kecil dengan mengurangi titik tepi dengan diameter *strut*, lalu terapkan fitur *loteng potong* untuk membuat *lattice* tepi dasar,
4. Buat bentuk *diamond* dengan membuat titik di tengah setiap titik dan terapkan fitur *add loft* lalu *cut loft* untuk membuat *diamond wire cube lattice*

Struktur *lattice* digenerasi menggunakan program Autodesk Inventor API berdasarkan koordinat X, Y, Z setiap elemen dalam *partial gear* dengan diameter *strut* bervariasi dari kluster 1-3 dan kluster 4

berbentuk solid dengan pengecualian lapisan atas dan bawah *inner gear* dibuat *solid* karena *partial gear* akan disimetriskan untuk menjadi *gear* yang utuh. Hasil generasi *lattice* pada *partial gear* terdapat pada Gbr.7 (a) bagian *inner* dan (b) bagian *outer*.

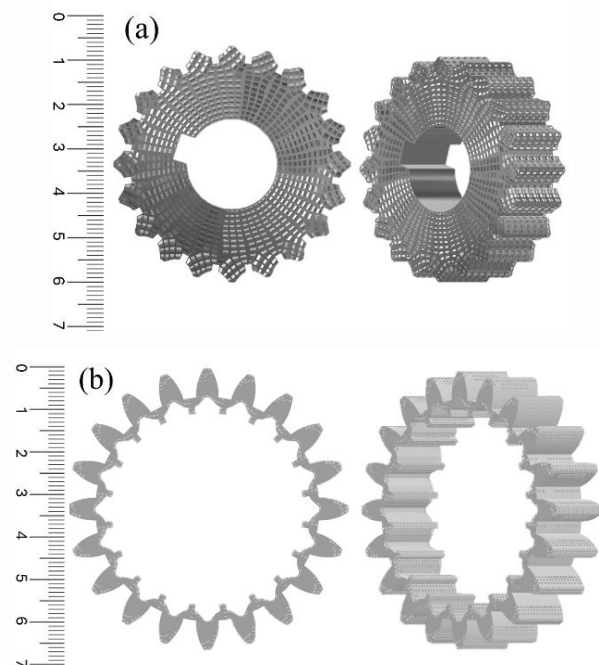


Gbr. 6 *Diamond Wire Cube Lattice*

Gbr. 7 (a) *Partial Inner Gear* (b) *Partial Outer Gear*

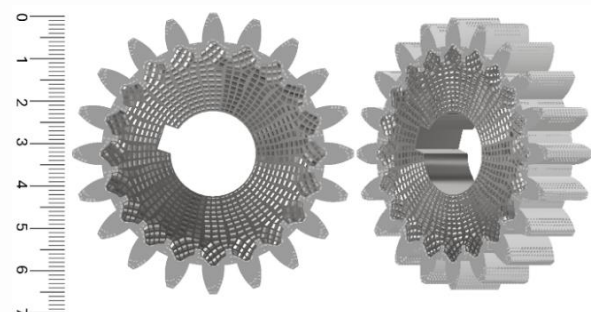
HASIL DAN PEMBAHASAN

Geometri akhir *inner lattice gear* ditunjukkan pada gbr. 8a dan *outer lattice gear* pada gbr. 8b.



Gbr. 8 (a) *Inner Lattice Gear* (b) *Outer Lattice Gear*

Desain lengkap *multi-material lattice gear* dengan dimensi variasional ditunjukkan pada gambar. 8.



Gbr 9. *Multi-material Lattice Gear*

Desain *gear lattice* dibagi menjadi dua geometri, *inner gear* dan *outer gear*. *Inner gear* harus memiliki kemampuan untuk mentransfer torsi dari *shaft* ke *gear*, sedangkan *outer gear* harus dapat menahan benturan kontak dengan *driven gear*. Oleh karena itu, material *outer gear* perlu memiliki sifat mekanik yang memadai. Karena harganya relatif lebih mahal, *outer gear* dirancang seminimal mungkin dengan persentase volume *outer gear* 34%.

Material yang digunakan untuk *outer gear* adalah Ti-6Al-4V yang difabrikasi dengan metode PBF sistem EOS M270 dengan orientasi longitudinal dengan sifat mekanik nilai $YS\ 1143 \pm 30\ MPa$ dan nilai $UTS\ 1269 \pm 9\ MPa$. Sementara itu, *inner gear* tidak harus memiliki kekuatan tinggi karena tidak kontak langsung dengan *driven gear*. Material yang digunakan untuk *inner gear* adalah 316 stainless steel yang difabrikasi dengan metode SLM dalam bidang XY dan sudut 30° horizontal dan memiliki nilai $YS\ 207\ MPa$ dan nilai $UTS\ 691\ MPa$.

Hasil analisis tegangan menunjukkan tegangan Von Mises tertinggi sebesar 402,06 MPa pada *outer gear*. Sementara hasil analisis *fatigue* menunjukkan nilai σ_{max} adalah 493,38 MPa pada *outer gear*. Sementara itu, pada *inner gear*, terdapat tegangan Von Mises tertinggi 242,17 MPa dan $\sigma_{max}\ 223,3\ MPa$. Semua nilai tegangan berada di bawah UTS sehingga tidak terjadi kegagalan. Hasil analisis termal menunjukkan nilai temperatur maksimal sebesar 337,24 K atau $64,1^\circ C$ terdapat pada permukaan gigi yang kontak dengan *driven gear*. Nilai ini berada pada temperatur *range* untuk operasional *gear* sebesar 50-140 $^\circ C$ [31].

Struktur *lattice* bervariasi pada diameter *strut*-nya berdasarkan klaster tegangan pada setiap elemen. Bentuk *lattice* yang digunakan adalah *diamond wire cube lattice* dengan geometri dan dimensi yang mengikuti hasil *meshing*. Selain itu, orientasi disesuaikan dengan tegangan. Orientasi *lattice* disesuaikan dengan arah tegangan agar mampu menahan tegangan.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini dapat direplikasi untuk membuat struktur *lattice* dengan dimensi variasional berdasarkan nilai tegangan, dengan syarat objek perlu memiliki data tegangan pada setiap *node* untuk membuat klaster elemen dan koordinat elemen *mesh* untuk menghasilkan struktur *lattice*.

Desain *lattice gear* multi-material memiliki presentasi massa *outer gear* yang terbuat dari material Ti-6Al-4V sebesar 26,32% (49,43 g) dan *inner gear* yang terbuat dari material stainless steel 316 sebesar

73,68% (138,38 g). Secara total, desain *lattice gear* multi-material mengurangi massa *gear* solid sebesar 34,8%.

KESIMPULAN

- *Lattice structure* dengan dimensi variasional berdasarkan nilai tegangan dapat diaplikasikan pada AM *gear* multi-material.
- Desain *gear lattice* dibagi menjadi dua geometri; *outer gear* terbuat dari material Ti-6Al-4V dan *inner gear* terbuat dari material stainless steel 316.
- *Gear* multi-material dirancang sedemikian rupa sehingga bagian luar yang digunakan hanya 34% dari total volume dan 26,32% dari total massa.
- Struktur *lattice* dalam desain *gear* memiliki diameter *strut* yang berbeda berdasarkan klaster tegangan setiap *node* dan bentuk berdasarkan *meshing*. Bentuk *lattice* yang digunakan adalah *diamond wire cube lattice* dengan geometri dan dimensi yang mengikuti hasil *meshing* dan orientasi sesuai arah tegangan.
- Objektif pembuatan *lattice gear* adalah mengurangi massa *gear* dengan hasil massa berkurang sebesar 34,8% dibandingkan dengan solid *gear*.
- Metode yang digunakan dalam penelitian ini dapat direplikasi untuk membuat *lattice structure* dengan dimensi variasional dengan menggenerasi *lattice* berdasarkan data tegangan setiap *node* dan koordinat *mesh*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menuliskan ucapan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional Indonesia atas penyediaan *software* Ansys untuk analisis.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, G.K.; metodologi, V.I.; software, V.I.; analisis, V.I.; investigasi, V.I.; validasi, G.K. dan R.I.; penulisan—persiapan draf asli, V.I.; menulis—meninjau dan menyunting, G.K. dan V.I.; visualisasi, V.I.; supervisi, G.K. dan R.I.; akuisisi pendanaan, G.K.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini telah didanai oleh Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi Indonesia, PKS-479/UN2.RST/HKP05.00/2025

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. J. Kharat *et al.*, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Mater Today Proc*, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.11.033.
- [2] D. M. Hajare and T. S. Gajbhiye, “Additive manufacturing (3D printing): Recent progress on advancement of materials and challenges,” *Mater Today Proc*, vol. 58, pp. 736–743, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.391.
- [3] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, pp. 1–10, Aug. 2012, doi: 10.5402/2012/208760.
- [4] K. R. Ryan, M. P. Down, N. J. Hurst, E. M. Keefe, and C. E. Banks, “Additive manufacturing (3D printing) of electrically conductive polymers and polymer nanocomposites and their applications,” Jul. 01, 2022, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.esci.2022.07.003.
- [5] J. Tkac, S. Samborski, K. Monkova, and H. Debski, “Analysis of mechanical properties of a lattice structure produced with the additive technology,” *Compos Struct*, vol. 242, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112138.
- [6] S. Das, D. L. Bourell, and S. S. Babu, “Metallic materials for 3D printing,” Oct. 01, 2016, *Materials Research Society*. doi: 10.1557/mrs.2016.217.
- [7] Y. Wang *et al.*, “Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: The knowledge evolution of 3D printing,” Jul. 01, 2021, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jmsy.2021.07.023.
- [8] C. Pan, Y. Han, and J. Lu, “Design and optimization of lattice structures: A review,” Sep. 02, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/APP10186374.
- [9] J. Elambasseril and M. Brandt, “Artificial intelligence: way forward to empower metal additive manufacturing product development – an overview,” *Mater Today Proc*, vol. 58, pp. 461–465, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.485.
- [10] C. Beyer and D. Figueroa, “Design and Analysis of Lattice Structures for Additive Manufacturing,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 138, no. 12, Dec. 2016, doi: 10.1115/1.4033957.
- [11] P. F. Egan, “Design for Additive Manufacturing: Recent Innovations and Future Directions,” Aug. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/designs7040083.
- [12] W. Tao and M. C. Leu, “Design of lattice structure for additive manufacturing,” in *International Symposium on Flexible Automation, ISFA 2016*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2016, pp. 325–332. doi: 10.1109/ISFA.2016.7790182.
- [13] X. Wang, R. Qin, B. Chen, X. Niu, and J. Zhou, “Multi-scale collaborative optimization of lattice structures using laser additive manufacturing,” *Int J Mech Sci*, vol. 222, May 2022, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107257.
- [14] A. Kholil, G. Kiswanto, A. Al Farisi, and J. Istiyanto, “Finite Element Analysis of Lattice Structure Model with Control Volume Manufactured Using Additive Manufacturing,” *International Journal of Technology*, vol. 14, no. 7, pp. 1428–1437, 2023, doi: 10.14716/ijtech.v14i7.6660.
- [15] J. Yang *et al.*, “Rational design and additive manufacturing of grain boundary-inspired, multi-architecture lattice structures,” *Mater Des*, vol. 235, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.matdes.2023.112448.
- [16] R. Ramadani *et al.*, “Topology optimization and additive manufacturing in producing lightweight and low vibration gear body,” doi: 10.1007/s00170-021-06841-w/Published.
- [17] R. Ramadani *et al.*, “Topology optimization and additive manufacturing in producing lightweight and low vibration gear body,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 113, no. 11–12, pp. 3389–3399, Apr. 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06841-w.
- [18] T. Tobie, F. Hippenstiel, and H. Mohrbacher, “Optimizing gear performance by alloy modification of carburizing steels,” *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 10, Oct. 2017, doi: 10.3390/met7100415.
- [19] M. Zmindak, M. Kaco, and A. Sapietova, “Analysis of the Contact Stresses of Spur Gears Manufactured by 3D Printing from Composite Materials,” *MATEC Web of Conferences*, vol. 357, p. 06003, 2022, doi: 10.1051/mateconf/202235706003.

- [20] Y. Xiong, Y. Tang, Q. Zhou, Y. Ma, and D. W. Rosen, "Intelligent additive manufacturing and design state of the art and future perspectives," *Addit Manuf*, vol. 59, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103139.
- [21] M. Losertová, M. Štamborská, J. Lapin, and V. Mareš, "Comparison of deformation behavior of 316L stainless steel and Ti6Al4V alloy applied in traumatology COMPARISON OF DEFORMATION BEHAVIOR OF 316L STAINLESS STEEL AND Ti6Al4V ALLOY APPLIED IN TRAUMATOLOGY Original Scientific Paper-Izvorni znanstveni rad," 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/303369275>
- [22] M. S. F. De Lima and S. Sankaré, "Microstructure and mechanical behavior of laser additive manufactured AISI 316 stainless steel stringers," *Mater Des*, vol. 55, pp. 526–532, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.10.016.
- [23] I. Tolosa, F. Garciandía, F. Zubiri, F. Zapirain, and A. Esnaola, "Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by 'selective laser melting', following different manufacturing strategies," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 5–8, pp. 639–647, Nov. 2010, doi: 10.1007/s00170-010-2631-5.
- [24] H. D. Nguyen *et al.*, "A critical review on additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties," May 01, 2022, *Elsevier Editora Ltda.* doi: 10.1016/j.jmrt.2022.04.055.
- [25] X. Shi *et al.*, "Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 684, pp. 196–204, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.msea.2016.12.065.
- [26] A. M. Beese and B. E. Carroll, "Review of Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Made by Laser-Based Additive Manufacturing Using Powder Feedstock," *JOM*, vol. 68, no. 3, pp. 724–734, Mar. 2016, doi: 10.1007/s11837-015-1759-z.
- [27] M. M. . Khonsari and E. Richard. Booser, *Applied tribology : bearing design and lubrication*. John Wiley & Sons Inc., 2017.
- [28] A. E. Ezugwu *et al.*, "A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects," Apr. 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.engappai.2022.104743.
- [29] W. Kwedlo, "A clustering method combining differential evolution with the K-means algorithm," *Pattern Recognit Lett*, vol. 32, no. 12, pp. 1613–1621, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.patrec.2011.05.010.
- [30] M. Kaushik, B. Mathur, and M. B. Mathur, "Comparative Study of K-Means and Hierarchical Clustering Techniques," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/293061584>
- [31] Z. J. Cai, X. Q. Zheng, H. Q. Lan, L. N. Wang, S. W. Yang, and R. Shen, "Predictive Model for Scuffing Temperature Field Rise of Spiral Bevel Gears under Different Machining Conditions," *Lubricants*, vol. 12, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/lubricants12100354.