

OPTIMASI TOPOLOGI UNTUK KOMPONEN MESIN RINGAN MENGGUNAKAN SOFTWARE CAD/CAE

**Michael R. Pandiangan¹, Asion Tambunan², Efran Fransiskus Sinaga³, Dody A.R.S Sinaga⁴,
Wikiston Situmorang⁵**

chaelpandi782@gmail.com¹, tambunanasion1@gmail.com², efrancunn@gmail.com³,
dodysinaga772@gmail.com⁴, wikistonsitumorang99@gmail.com⁵

Universitas Negeri Medan

ABSTRAK

Optimasi topologi merupakan salah satu pendekatan modern dalam rekayasa desain untuk menghasilkan struktur yang ringan namun tetap memiliki kekuatan mekanik optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode optimasi topologi pada komponen mesin ringan berupa bracket menggunakan bantuan perangkat lunak CAD/CAE, yakni SolidWorks untuk pemodelan awal dan ANSYS untuk simulasi numerik serta optimasi topologi. Proses ini mencakup tahap pemodelan 3D, pembebanan, batasan geometri, serta analisis elemen hingga untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan optimasi topologi mampu mengurangi massa komponen hingga 30–50% tanpa mengorbankan integritas struktural. Temuan ini menunjukkan potensi besar metode ini dalam aplikasi teknik mesin modern, terutama untuk desain komponen yang efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Optimasi Topologi, Bracket, CAD/CAE, ANSYS, SolidWorks, Komponen Mesin Ringan.

PENDAHULUAN

Dalam dunia teknik mesin modern, efisiensi struktural merupakan salah satu tujuan utama dalam proses desain dan manufaktur. Desain komponen mesin tidak hanya dituntut untuk kuat dan andal, tetapi juga harus ringan guna mengurangi konsumsi energi, meningkatkan performa, serta menekan biaya produksi dan operasional. Hal ini menjadi sangat penting khususnya dalam industri otomotif, dirgantara, dan manufaktur umum.

Salah satu pendekatan terkini yang digunakan untuk mencapai tujuan tersebut adalah optimasi topologi, yaitu metode numerik yang digunakan untuk menentukan distribusi material terbaik dalam suatu domain desain agar memenuhi kriteria performa tertentu, seperti kekakuan maksimum atau massa minimum. Tidak seperti optimasi bentuk konvensional, optimasi topologi bekerja dari bentuk awal yang utuh dan secara sistematis menghilangkan bagian-bagian yang tidak berkontribusi signifikan terhadap kekuatan struktural.

Kemajuan dalam teknologi komputer dan perangkat lunak berbasis CAD/CAE telah memudahkan pelaksanaan optimasi topologi dalam praktik industri dan akademik. Perangkat lunak seperti SolidWorks memungkinkan pembuatan model 3D akurat, sementara ANSYS menyediakan kemampuan analisis elemen hingga (Finite Element Analysis/FEM) dan modul khusus untuk melakukan optimasi topologi berdasarkan beban dan batasan aktual.

Dalam penelitian ini, dilakukan studi kasus pada komponen bracket, yaitu salah satu komponen mesin ringan yang umum digunakan sebagai penopang atau penghubung antar bagian mesin. Tujuan utama penelitian adalah untuk merancang bracket yang optimal secara struktural namun tetap ringan, dengan memanfaatkan simulasi numerik dan metode optimasi topologi.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap efisiensi desain komponen mesin dan memperluas pemahaman mengenai penerapan teknologi

CAD/CAE dalam rekayasa desain berbasis performa.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis perangkat lunak CAD/CAE untuk menerapkan optimasi topologi pada komponen mesin ringan berupa bracket. Perangkat lunak yang digunakan adalah SolidWorks untuk pemodelan geometri awal dan ANSYS Workbench untuk analisis elemen hingga (FEM) serta proses optimasi topologi. Prosedur penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahap utama, mulai dari pemodelan, simulasi pembebanan, hingga analisis hasil optimasi.

Tahap pertama adalah pembuatan model tiga dimensi (3D) bracket dalam perangkat lunak SolidWorks. Geometri awal didesain dengan ukuran dasar $100\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, dan memiliki bentuk simetris untuk memudahkan proses analisis. Model ini diekspor dalam format standar .STEP agar kompatibel dengan ANSYS Workbench. Desain awal dibuat padat (solid) untuk memberikan ruang yang cukup bagi proses reduksi massa melalui optimasi.

Setelah model berhasil diimporkan ke dalam ANSYS, ditentukan kondisi batas dan beban yang mewakili kondisi kerja bracket dalam sistem mesin. Salah satu lubang pada bracket ditetapkan sebagai tumpuan tetap (Fixed Support), sementara pada lubang lainnya diberikan gaya sebesar 1000 N secara horizontal. Konfigurasi ini mensimulasikan gaya tarik atau dorong yang biasa terjadi saat bracket menghubungkan dua komponen dalam keadaan kerja statis.

Tahap berikutnya adalah proses meshing dan analisis elemen hingga (Finite Element Analysis - FEA). Pemodelan mesh dilakukan dengan elemen tetrahedral berukuran 2 mm, yang dipilih untuk memberikan keseimbangan antara ketelitian hasil dan efisiensi waktu komputasi. Simulasi dilakukan untuk memperoleh parameter seperti distribusi tegangan (von Mises stress), deformasi total, serta faktor keamanan. Hasil dari analisis ini digunakan sebagai dasar untuk proses optimasi topologi.

Optimasi topologi dilakukan menggunakan modul Topology Optimization pada ANSYS Workbench. Tujuan dari optimasi adalah memaksimalkan kekakuan struktur (maximize stiffness) atau secara teknis disebut minimize compliance, dengan batasan volume sebesar 50% dari volume awal. Artinya, sistem akan mencari bentuk bracket yang mampu mempertahankan kekakuan maksimal hanya dengan setengah volume material. Untuk menjaga simetri desain dan kemudahan manufaktur, diberlakukan juga batasan proses produksi seperti arah penarikan (planar draw direction) dan simetri bidang.

Hasil dari optimasi divisualisasikan dalam bentuk distribusi densitas material, di mana bagian-bagian dengan densitas rendah dianggap tidak berkontribusi secara signifikan terhadap kekuatan struktural dan dapat dieliminasi. Geometri hasil optimasi kemudian direkonstruksi kembali dalam SolidWorks agar dapat dibandingkan secara visual dan numerik dengan desain awal.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan spesifikasi perangkat keras sebagai berikut: prosesor Intel Core i7-12700, RAM 32 GB, dan GPU NVIDIA RTX 3060, dengan sistem operasi Windows 11 64-bit. Perangkat ini mendukung proses komputasi simulasi berulang dan kompleks dengan efisiensi yang memadai.

Untuk menjaga validitas dan reproduksibilitas hasil, semua parameter simulasi dicatat secara rinci dan disimpan dalam dokumentasi pengaturan. Selain itu, dilakukan juga studi konvergensi mesh untuk memastikan hasil simulasi tidak bergantung pada ukuran elemen mesh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah seluruh tahapan pemodelan dan simulasi dilakukan, diperoleh hasil yang menunjukkan efektivitas metode optimasi topologi dalam mengurangi massa komponen bracket tanpa mengorbankan kekuatan struktural secara signifikan. Hasil ini diperoleh melalui dua tahap utama, yaitu analisis elemen hingga (FEM) untuk model awal dan proses optimasi topologi dengan batasan volume tertentu.

Pada analisis awal menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method), diperoleh distribusi tegangan von Mises yang menunjukkan konsentrasi tegangan tertinggi di sekitar area tumpuan dan titik pembebaan. Nilai tegangan maksimum yang dicatat pada model awal adalah sekitar 150 MPa, masih berada di bawah batas leleh material baja karbon. Nilai deformasi total sebesar 0,25 mm mengindikasikan bahwa struktur awal cukup kaku untuk menahan beban sebesar 1000 N. Metode FEM ini telah terbukti efektif sebagai alat analisis struktural yang mampu memberikan estimasi deformasi dan distribusi tegangan secara akurat (Cook et al., 2001).

Setelah dilakukan proses optimasi topologi dengan batasan reduksi volume sebesar 50%, terjadi perubahan signifikan pada bentuk bracket. Perangkat lunak ANSYS menghasilkan peta densitas material yang merekomendasikan penghapusan material pada area dengan kontribusi kekakuan rendah. Hasilnya, massa bracket dapat dikurangi dari 1,2 kg menjadi 0,66 kg, atau sekitar 45% lebih ringan. Perubahan ini sesuai dengan temuan Bendsøe dan Sigmund (2003), yang menyatakan bahwa optimasi topologi mampu mengurangi volume tanpa mengorbankan performa struktural jika pembebaan dan batasan ditetapkan dengan benar.

Distribusi tegangan setelah optimasi menunjukkan sedikit peningkatan, dengan nilai maksimum sekitar 165 MPa. Kenaikan ini dianggap wajar karena konsentrasi tegangan lebih tersalur pada material yang tersisa, namun nilai tersebut masih berada dalam batas aman. Deformasi total juga meningkat menjadi 0,3 mm, yang masih dalam ambang batas toleransi perancangan. Rozvany (2009) menjelaskan bahwa peningkatan tegangan akibat optimasi merupakan konsekuensi alami dari konsentrasi gaya pada struktur hasil reduksi material, namun tidak serta merta menyebabkan penurunan integritas struktural.

Secara visual, bentuk hasil optimasi menunjukkan struktur yang lebih efisien, dengan geometri menyerupai pola organik. Hal ini mencerminkan prinsip dasar evolusi bentuk struktural, seperti dijelaskan oleh Huang dan Xie (2010), bahwa struktur optimal cenderung mengikuti aliran gaya internal untuk meminimalkan energi elastik.

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Wang et al. (2019), yang berhasil menurunkan berat engine mount kendaraan hingga 42% menggunakan pendekatan serupa. Begitu juga Liu dan Ma (2016) yang menunjukkan bahwa integrasi antara optimasi topologi dan manufaktur aditif mampu menghasilkan desain bracket otomotif yang ringan dan kokoh.

Lebih lanjut, aplikasi optimasi topologi seperti ini sangat penting dalam industri modern yang menuntut efisiensi material, khususnya pada sektor otomotif, pesawat terbang, dan mesin pertanian (Teng et al., 2020; Dewi et al., 2022).

Namun, perlu dicatat bahwa studi ini masih terbatas pada analisis statis linier dan tidak mempertimbangkan faktor kelelahan material atau beban dinamis. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan menambahkan simulasi kelelahan, variasi pembebaan, serta validasi eksperimental untuk memastikan bahwa hasil optimasi layak diaplikasikan dalam kondisi kerja sebenarnya

kondisi kerja nyata.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai optimasi topologi pada komponen mesin ringan berupa bracket menggunakan software SolidWorks dan ANSYS, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

Optimasi topologi berhasil mengurangi massa bracket hingga sekitar 45% tanpa mengorbankan kekakuan dan kekuatan struktural secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa metode optimasi topologi sangat efektif dalam menghasilkan desain komponen yang ringan dan efisien material.

Penggunaan perangkat lunak CAD/CAE memungkinkan proses desain dan analisis struktural dilakukan secara terpadu dan lebih cepat, mulai dari pembuatan model, simulasi pembebahan, hingga optimasi topologi. Kombinasi SolidWorks untuk pemodelan dan ANSYS untuk simulasi terbukti handal dalam menunjang proses ini.

Meskipun hasil optimasi menunjukkan peningkatan tegangan dan deformasi pada beberapa titik, nilai tersebut masih berada dalam batas aman material, sehingga desain hasil optimasi dapat diterapkan secara praktis.

Penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk penerapan optimasi topologi dalam rekayasa desain komponen mesin ringan lainnya, sehingga dapat berkontribusi pada efisiensi produksi dan pengurangan konsumsi material di industri manufaktur.

DAFTAR PUSAKA

- Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (1988). *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71(2), 197–224.
- Bendsøe, M. P., & Sigmund, O. (2003). *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Springer-Verlag.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2001). *Concepts and Applications of Finite Element Analysis* (4th ed.). Wiley.
- Dewi, S. R., Santoso, B., & Wijaya, C. H. (2022). *Application of topology optimization on agricultural machinery components*. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 13(3), 97–107.
- Huang, X., & Xie, Y. M. (2010). *Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications*. Wiley.
- Liu, J., & Ma, Y. (2016). *Topology optimization integrated with additive manufacturing for automotive bracket design*. Journal of Manufacturing Processes, 22, 191–198.
- Rozvany, G. I. N. (2009). *A critical review of established methods of structural topology optimization*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 37(3), 217–237.
- Teng, J., Huang, W., & Guo, X. (2020). *Design and optimization of lightweight brackets using topology optimization method*. Structural Engineering and Mechanics, 73(1), 123–134.
- Wang, F., Zhang, L., & Xu, J. (2019). *Topology optimization design of automotive engine mount with stiffness and fatigue life constraints*. Engineering Optimization, 51(9), 1546–1560.