

Optimasi Perancangan Rangka *Airboat* menggunakan metode *Quality Function Deployment* dan *Full Factorial Design*

Fajar Ibrahim Sulaksono¹⁾ dan Alva Edy Tontowi¹⁾

¹⁾Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

Corresponding Author: Fajar Ibrahim Sulaksono (fajar.ibrahim@mail.ugm.ac.id)

Abstract

An airboat is a versatile vehicle designed for operation on both land and shallow waters, powered by an air propeller. These vessels are commonly utilized for recreational purposes, search and rescue operations, military applications, and transportation in remote areas. As development in these regions progresses, the demand for airboats has grown. However, challenges such as limited carrying capacity and inadequate damping call for innovations in frame design. This study aims to develop a new frame design that is both more robust and reliable, employing the Quality Function Deployment (QFD) method in conjunction with Full Factorial Design. The factors considered include passenger capacity, design model, and material. The findings indicate that the optimal design is achieved with a combination of carbon steel material, a rectangular ISO 10799 design model, and a capacity to accommodate three passengers with luggage. This configuration yields a von Mises stress of 29.927 MPa and a safety factor of 11.6952.

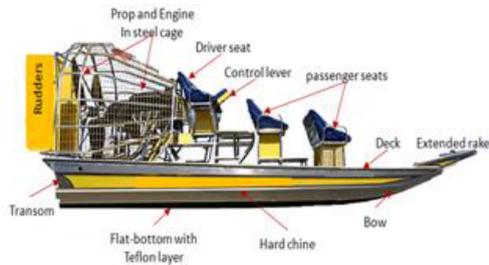
Keywords: *Airboat, frame, QFD (Quality Function Deployment), Full Factorial Design, von Mises stress, Safety Factor*

1. Pendahuluan

Airboat merupakan salah satu alat transportasi air yang ditenagai oleh mesin penggerak udara yang memanfaatkan tenaga dorong yang dihasilkan dari putaran propeller. Prinsip kerjanya melibatkan reaksi fluida yang menghasilkan gaya dorong yang memungkinkan *airboat* untuk bergerak maju dengan kecepatan tertentu. *Airboat* pertama kali dikembangkan pada tahun 1905 di Nova Scotia, Kanada. Selain itu, *airboat* juga sering disebut sebagai *fan boat*, karena menggunakan penggerak berupa baling-baling atau kipas. Komponen-komponen utama dari *airboat* melibatkan motor penggerak, fan, turbin, dan

rangka (Rahaman, 2014). Kendaraan ini sering digunakan dalam berbagai kegiatan seperti kegiatan wisata dan rekreasi, aktivitas pencarian dan penyelamatan, keperluan militer, serta transportasi logistik di wilayah dengan perairan yang dangkal. *Airboat* dirancang dengan bentuk bagian bawah badan perahu yang disebut *flow-line* dan *flow-bottom* untuk memberikan kemampuan gerak dan stabilitas yang optimal. Secara umum, sistem propulsi *airboat* terdiri dari *airscrew propeller* dan mesin penggerak dari jenis mesin pesawat atau otomotif, dimana *propeller* dan main engine dihubungkan oleh poros. Gerakan *airboat* tidak menciptakan *wake wash* atau gelombang air. Sehingga

besarnya hambatan karena pengaruh gelombang air memiliki nilai yang sangat kecil.

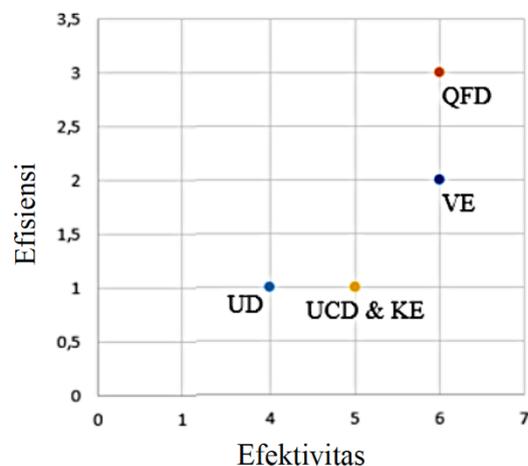


Gambar 1. Bagian *Airboat* pada umumnya (Faango Keribo dan Tamunodukobipi, 2017)

Seiring dengan pertumbuhan penduduk di Indonesia, kondisi ekonomi memberikan kabar baik bagi pelaku ekonomi. Semua pengusaha menganggapnya sebagai peluang baik untuk industri manufaktur dan jasa. Permintaan akan transportasi di Indonesia meningkat setiap tahunnya. Permintaan terhadap airboat diperkirakan akan bertambah seiring dengan perluasan pembangunan di beberapa wilayah terpencil, yang aksesnya hanya mungkin dijangkau melalui jalur perairan. Pada umumnya struktur kursi terpasang dengan las pada struktur rangka di airboat yang membuatnya tidak fleksibel untuk mengangkut kapasitas yang banyak dan hanya diperuntukkan mengangkut 1 penumpang saja sehingga dari segi transportasi airboat saat ini kurang efisien. Selain bisa digunakan di area darat, rawa hingga sungai karena mengandalkan tenaga penggerak sistem udara, pengoperasian di daratan kering menghasilkan tumbukan atau guncangan saat melintasi gundukan. Gaya dari guncangan ini ditransfer langsung dari airboat ke pengemudi dan penumpang lainnya di atas airboat. Paparan yang berkepanjangan terhadap hasil gaya guncangan tersebut dapat menyebabkan cedera pada pengemudi dan penumpang (Broad et al, 2009).

Pada studi yang telah dilakukan mengenai *airboat*, fokus penelitian masih pada aspek *hydrodynamics* dan evaluasi mesin penggerak seperti sudu fan dan *propeller* (Dissanayake dan Gunarathna, 2020), belum memperhatikan secara mendalam aspek

fungsional. Terdapat penelitian tentang rancang bangun dan klaim *patent* yang telah dilakukan tentang perancangan yang dilakukan pada *hull*. Broad et al. (2009) mengklaim tentang modifikasi rangka *airboat* dengan suspensi. Suspensi dan rangka terpasang secara permanen menggunakan sambungan las, membuatnya tidak dapat dilepas pasang. Selain itu, penelitian tersebut dirancang khusus untuk menampung satu penumpang dan satu pengemudi, sehingga tidak cocok untuk diaplikasikan di daerah dengan banyak orang, terutama saat digunakan di hutan atau dalam situasi bencana alam. Sementara pada penelitian yang melakukan rancang bangun juga memiliki desain yang sama namun tanpa suspensi. Rangka *airboat* dipasang dirancang permanen tidak bisa dilepas pasang (Leppek, 2012). Sehingga diperlukan upaya melakukan perbaikan pada desain rangka *airboat* untuk mengurangi getaran dari guncangan sekaligus menambah kapasitas penumpang *airboat* ketika dipakai untuk membawa penumpang.



Gambar 2. Grafik Efektif dan Efisiensi Metode Desain

Mengenai efektivitas dan efisiensi metode desain yang umum digunakan dalam lima tahun terakhir menjadi landasan untuk membantu desainer dalam memilih metode yang sesuai dengan tujuan desainer. Antara tahun 2019 hingga 2023, beberapa metode desain yang paling efektivitas dan efisiensinya tinggi adalah *value engineering*, *quality function deployment (QFD)*, *user*

centered design, *universal design* dan *kansei engineering*. Evaluasi tentang efektivitas dan efisiensi dari kelima metode tersebut telah dilakukan, dan hasil perhitungan menunjukkan bahwa QFD dianggap sebagai metode yang paling efektif dan efisien seperti yang ditunjukkan pada tabel 2 (Widyastuti, et al., 2020).

Purba et al. (2020) menekankan pentingnya adaptasi teknologi dan alat pasca penerapan konsep *Quality Function Deployment* (QFD) untuk mencapai hasil yang lebih presisi dalam memenuhi kebutuhan pengguna. Mereka juga mendorong penggunaan pendekatan lain seperti *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), *Analytic Hierarchy Process* (AHP), dan berbagai metode optimasi oleh peneliti di masa depan untuk meningkatkan keakuratan studi. Saat ini, *Design of Experiment* (DOE) menjadi metode populer di kalangan peneliti untuk mengidentifikasi faktor-faktor penting dan mencapai karakterisasi optimal dalam penelitian, khususnya untuk eksperimen dengan sifat dan proses yang kompleks. Penerapan DOE yang efektif dapat meningkatkan efisiensi sumber daya dan menghasilkan data yang akurat, yang berperan sebagai dasar penting untuk penelitian selanjutnya (Jankovic, Chaudhary dan Goia, 2021). Terdapat 3 metode DOE yang bisa digunakan antara lain : *Respond Surface Method*, *Taguchi Method* dan *Full Factorial Design*. Sergis dan Ouellet-Plamondon (2022) menjelaskan bahwa *Full Factorial Design* dipilih karena kecocokannya dalam optimasi desain dengan berbagai pilihan parameter. Desain eksperimental ini menggabungkan semua kemungkinan kombinasi dari faktor dan levelnya, menghasilkan jumlah eksperimen yang lebih banyak. Hal ini memungkinkan metode untuk secara efektif menentukan interaksi mana yang berdampak signifikan pada hasil penelitian. Hasil optimasi desain menggunakan metode *Full Factorial Design* akan diuji menggunakan *stress analysis* dengan bantuan *Computer-Aided Engineering* (CAE) yang akan memberikan data tentang *von mises stress*, *displacement* dan *safety factor*. *Stress analysis* menggunakan bantuan

CAE mampu menampilkan pemetaan detail dari distribusi tegangan yang terjadi di seluruh *frame* rangka airboat. Dengan mempertimbangkan masalah-masalah yang telah diidentifikasi, penulis merasa termotivasi untuk merancang ulang rangka *airboat* dan menganalisis sifat mekanis serta biaya produksinya, melalui penggunaan gabungan metode *Quality Function Deployment* (QFD) dan *Full Factorial Design*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menemukan alternatif desain rangka baru yang memenuhi kebutuhan pengguna *airboat*.

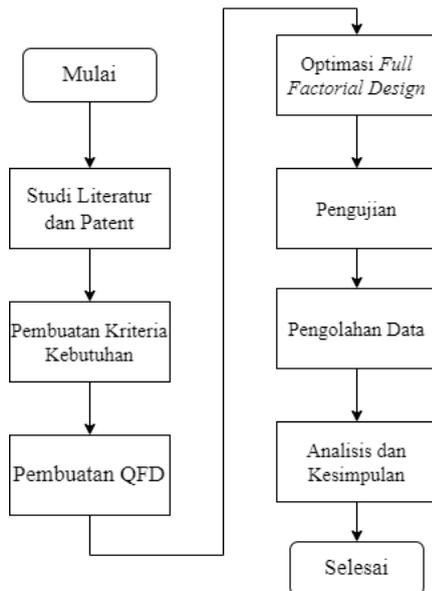
2. Metodologi

Alur Penelitian

Adapun tahapan yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3. Penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur dan penemuan paten mengenai *airboat*. Kemudian dilakukan penyusunan kriteria pengguna *airboat* untuk kemudian dipakai sebagai parameter pada *Quality Function Deployment* (QFD). QFD digunakan untuk mengevaluasi konsep satu per satu untuk nantinya dikembangkan alternatif konsep desain baru. Metode QFD cukup sederhana dan telah terbukti efektif untuk membandingkan konsep alternatif. Terdapat 5 kriteria yang dijadikan sebagai landasan untuk merespon kebutuhan pengguna, antara lain : *cost efficiency*, *safety*, *frame adjustable*, kapasitas dan mampu meredam getaran, yang masing masing memiliki target yang harus dicapai.

Cost efficiency didasarkan pada biaya produksi. Biaya produksi direncanakan tidak lebih dari Rp. 2.115.000. Sementara pada *safety* didasarkan pada keamanan dan keselamatan menggunakan *airboat* yang ditentukan berdasarkan pengujian *stress analysis*. Keamanan dan keselamatan direncanakan tidak melebihi *yield strength* yang diizinkan agar tidak terjadi *fracture* saat menerima beban yang tinggi. Sementara pada kriteria *frame adjustable* meliputi kemampuan rangka *airboat* untuk dilepas pasang menyesuaikan kebutuhan. Pada

kriteria kapasitas direncanakan *airboat* mampu menampung lebih dari 5 orang atau 3 orang namun dengan tambahan bagasi. Kemudian mampu meredam getaran ditargetkan mampu meredam getaran jika *airboat* digunakan di medan darat atau perairan dangkal.



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

Data kebutuhan pengguna diidentifikasi menggunakan metode etnografi berdasarkan *existing product* (Tontowi, 2020). Sehingga ditetapkan data kebutuhan pengguna harus berdasarkan penelitian rancang bangun atau paten yang sudah terbit. Tiga penemuan paten dan satu penelitian rancang bangun digunakan sebagai referensi spesifikasi untuk mencapai target yang diinginkan. Penilaian dari sebuah produk menggunakan nilai positif dimana spesifikasi produk desain melebihi target yang diberikan, nol mengartikan produk desain memiliki spesifikasi yang sama dengan target dan negatif dianggap spesifikasi produk desain kurang dari target yang ditetapkan (Yoder et al., 2017).

Tabel 1. Kriteria Penilaian untuk Penilaian Produk Terkini

Score Criteria	
-1	Worse Than
0	The Same
+0	Better Than

Berdasarkan data pada empat patent yang digunakan referensi kemudian dibuatkan matriks *House of Quality* (HOQ). Namun pada penelitian ini HOQ pada metode QFD mengalami pembaruan dan penyederhanaan berdasarkan kebutuhan untuk mengevaluasi desain yang sudah ada (Yoder et al., 2017). Setelah melakukan penilaian terhadap produk yang digunakan, didapatkan satu spesifikasi yang selanjutnya menjadi bahan spesifikasi untuk dioptimasi menggunakan *Full Factorial Design* guna memvalidasi desain *airboat* dari segi *mechanical properties* namun dengan biaya produksi yang sesuai perencanaan (Jankovic, Chaudhary dan Goia, 2021).

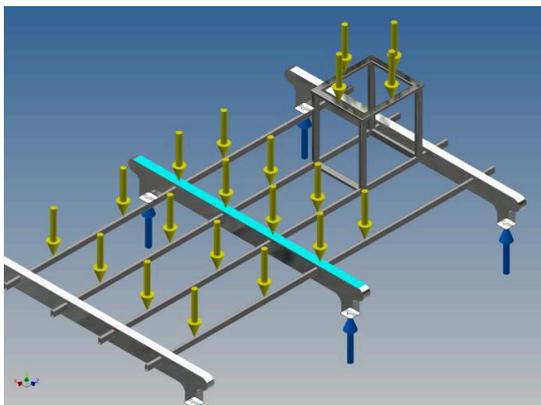
Dalam *full factorial design*, optimasi melibatkan penentuan kombinasi terbaik dari nilai-nilai faktor untuk mencapai hasil yang diinginkan. Metode matematika atau statistik sering digunakan untuk menemukan kombinasi faktor yang optimal sesuai dengan tujuan atau kriteria tertentu. Pendekatan ini bermanfaat dalam berbagai bidang seperti perancangan produk, proses manufaktur, pengujian produk, dan penelitian ilmiah, di mana beberapa faktor dapat memengaruhi hasil akhir. Dengan memahami dan mengoptimalkan kombinasi faktor-faktor yang terlibat, faktorial desain membantu meningkatkan efisiensi eksperimen dan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang hubungan antar faktor tersebut (Sergis dan Ouellet-Plamondon, 2022).

Pengujian *stress analysis* dilakukan menggunakan bantuan *software Computer-Aided Engineering* (CAE) yaitu Autodesk Inventor 2017. CAE adalah penggunaan perangkat lunak komputer untuk membantu dalam rekayasa dan analisis desain produk. Salah satu keunggulan penggunaan CAE adalah mampu melakukan simulasi *stress analysis*, validasi, dan optimasi desain produk dan proses manufaktur. Pada penelitian ini pengujian meliputi *stress analysis* menggunakan metode *finite element analysis* (FEA) yang dapat menghasilkan *von mises stress*, *displacement* dan *safety factor*.

Material yang dipilih untuk memenuhi respons kebutuhan pasar adalah aluminium dan *steel carbon*, karena ketersediaannya yang mudah didapatkan di pasar dan berdasarkan penelitian sebelumnya yang memiliki sifat dan karakter seperti yang ditunjukkan pada tabel 2 (Leppek, 2012). Dari penggunaan metode FEA diharapkan tegangan yang terjadi tidak melebihi dari tegangan yang diizinkan agar tidak terjadi *fracture*. Beban direncanakan sebesar 900 N pada satu area/tempat duduk seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.

Tabel 2. Material Properties

Material Properties	Aluminium	Steel Carbon
Yield Strength	275 MPa	350 MPa
Ultimate Tensile Strength	310 MPa	420 MPa
Mass Density	2,7 gr/cm ³	7,85 gr/cm ³



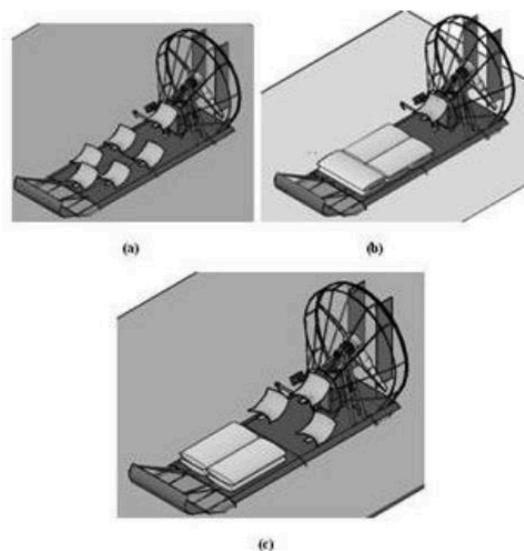
Gambar 3. Distribusi Tegangan

Data Penelitian

Pada penelitian ini terdapat 4 produk yang dijadikan referensi sebagai data yang akan dibandingkan di QFD. Untuk masuk menjadi produk diwajibkan memenuhi salah satu dari 2 kualifikasi yaitu mampu meredam getaran dan memiliki kapasitas penumpang lebih dari 1 atau memiliki bagasi yang luas untuk merespon permintaan pengguna. Berikut adalah 4 produk yang akan dibandingkan:

a. Produk 1

Albiero et al. (2016) melakukan penelitian tentang perencanaan *airboat* dengan mengusung konsep ramah lingkungan. Konsep desainnya memiliki desain rangka *airboat* secara umum terdiri 4 *long member* yang digabungkan menjadi satu menggunakan botol PTE 1 liter bekas. *Airboat* ini memiliki 2 konfigurasi yaitu : 4 penumpang dan 1 pengemudi dan 2 penumpang, 1 pengemudi dan bagasi. Rangka direncanakan bisa diganti sesuai dengan kebutuhan mengikuti konfigurasi.



Gambar 4. Desain *Airboat* produk 1 (Albiero et al., 2016)

b. Produk 2

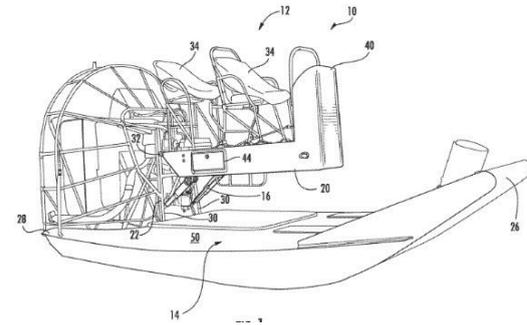
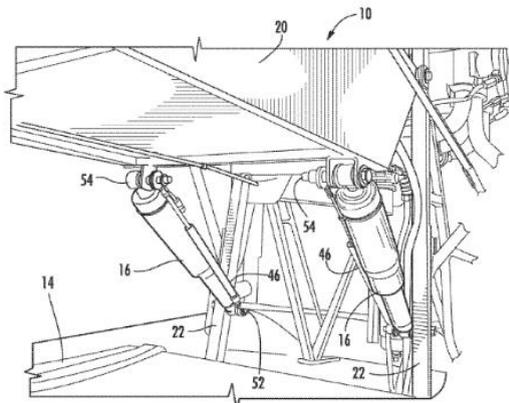
Pada produk 2 terdapat penelitian yang melakukan rancang bangun *airboat* dengan kapasitas 1 penumpang dan 1 pengemudi ditambah bagasi yang luas namun tanpa suspensi. Rangka *airboat* dipasang dirancang permanen tidak bisa dilepas pasang (Leppek, 2012).



Gambar 5. Desain *Airboat* Produk 2 (Leppek, 2012)

c. Produk 3

Broad et al. (2009) melakukan klaim paten bernomor US 07789034B1. Penemuan yang diklaim adalah tentang rangka *airboat* yang tinggi untuk visibilitas penumpang dan suspensi udara yang bisa di adjustment untuk meredam getaran ketika *airboat* digunakan di darat.

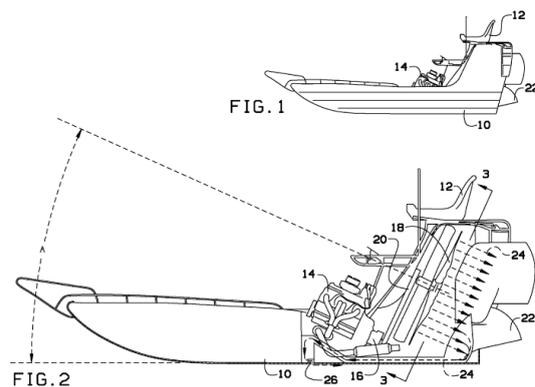


Gambar 6. Desain *Airboat* Produk 3 (Broad et al, 2009)

Airboat yang dirancang hanya diperuntukkan untuk 1 pengemudi dan 1 penumpang. Selain itu penggunaan rangka untuk penumpang tinggi diklaim untuk menambah kapasitas bagasi di lambung kapal. Sehingga dapat disimpulkan dari penelitian ini sistem rangka dengan di integrasikan dengan suspensi bisa dikombinasikan sebagai peredam saat menggunakan *airboat* di darat.

d. Produk 4

McDermott et al. (2013) mengklaim paten tentang *airboat* yang memiliki desain rangka pengemudi sekaligus penumpang diatas mesin. Sehingga *hull airboat* yang cukup luas bisa digunakan untuk bagasi. Rangka *airboat* dipasang dirancang permanen tidak bisa dilepas pasang.



Gambar 7. Desain *Airboat* Produk 4 (McDermott et al, 2013)

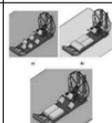
3. Hasil dan Pembahasan

Quality Function Deployment

Dari hasil penilaian keseluruhan keempat produk menggunakan QFD seperti yang ditunjukkan pada tabel 3 dihasilkan spesifikasi sebagai berikut :

- a. Rangka terdiri dari 4 long member.
- b. Desain memiliki tegangan dibawah dari yield strength (<290 MPa).
- c. Rangka flexible mampu diganti sesuai kebutuhan.
- d. Mampu meredam getaran dengan penambahan suspensi.
- e. Kapasitas bagasi luas dan mampu menampung lebih dari 2 penumpang.

Tabel 3. Penilaian 4 Produk

CRITERIA (WHAT DESCRIPTION)	Criteria						WEIGHTED SCORE
	Cost Efficiency	Safety (Strong Material)	Frame Adjustable	Mampu Meredam Getaran	Kapasitas Penumpang		
WEIGHT	Criteria 1	Criteria 2	Criteria 3	Criteria 4	Criteria 5	Criteria 6	
	3 20%	5 33%	1 7%	4 27%	2 13%		15 100%
Produk (ealon spesifikasi)	Criteria SCORES						
Product 1	1	1	1	-1	1		7,0
Product 2	0	1	-1	-1	1		2,0
Product 3	0	1	1	1	0		10,0
Product 4	1	1	-1	-1	0		3,0
Target (satuan)	≤ Rp. 2.115.000	≤ 290Mpa dan Jenis Material	Bisa / Tidak	Bisa / Tidak	≥ 3 orang dan Bagasi		
Alternatif	Product 1 dan 4	Product 1, 2, 3 dan 4	Product 1 dan 3	Product 3	Product 1		
Spesifikasi		Bahan steel carbon dan hasil pengujian FEA memenuhi tegangan yang diizinkan	Bisa di adjustment	Penambahan Komponen Peredam			

Full Factorial Design

Spesifikasi yang telah dihasilkan dari QFD selanjutnya dioptimasi guna mendapatkan konfigurasi spesifikasi yang memiliki mechanical strength minimal dengan beban yang besar. Replikasi yang dilakukan didasarkan pada design of experiment (DOE) 2k Full Factorial Design yang dibuat seperti yang ditunjukkan pada tabel 3. Terdapat 2 level dan 3 parameter yang ditetapkan yaitu :

- a. Jenis material Frame yang terdiri dari aluminium (ISO 4019) dan steel carbon (ISO 10799)
- b. Model desain yang terdiri dari Circular dan Rectangular
- c. Kapasitas penumpang yang terdiri dari 5 (1 pengemudi dan 4 penumpang) dan 8 (1 pengemudi, 2 penumpang dengan bagasi)

Tabel 4. Hasil Replikasi 8 Pengujian

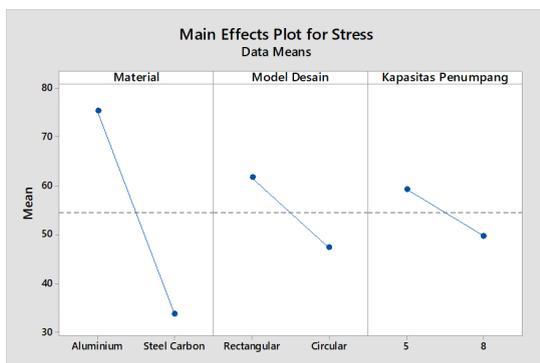
Tabel 3. Nilai Parameter dan Level yang Digunakan pada Full Factorial Design

Parameter	Level	
	-1	1
Jenis Material Frame	Aluminium	Steel Carbon
Model Desain	Circle	Rectangular
Kapasitas Penumpang	5	8

Hasil 8 replikasi desain rangka airboat yang didapatkan sebagai berikut :

Pengujian	Material	Model Desain	Kapasitas Penumpang	Von Mises Stress (MPa)
1	Aluminium	Circular	8	70,2477
2	Steel Carbon	Rectangular	5	35,291
3	Aluminium	Rectangular	8	63,478
4	Steel Carbon	Circular	5	34,526
5	Steel Carbon	Circular	8	35,199
6	Aluminium	Circular	5	49,25
7	Aluminium	Rectangular	5	117,97
8	Steel Carbon	Rectangular	8	29,927

Berdasarkan hasil optimasi menggunakan *Full Factorial Design* didapatkan *main effect plot* faktor yang berpengaruh terhadap *von mises stress*. *Main effect plot* digunakan sebagai analytical tools pada DOE untuk membandingkan kekuatan relatif terhadap efek pada beberapa faktor. Dari hasil pengujian didapatkan pemilihan material menjadi sangat pengaruh pada *von mises stres*. Pada penggunaan material aluminium *von mises stres* terjadi cukup tinggi sehingga jika beban ditambah sedikit saja bisa berpotensi patah. Namun pada penggunaan *steel carbon* didapatkan hasil *von mises stres* yang berarti desain menggunakan material *steel carbon* memiliki kekuatan yang lebih besar dibandingkan aluminium.



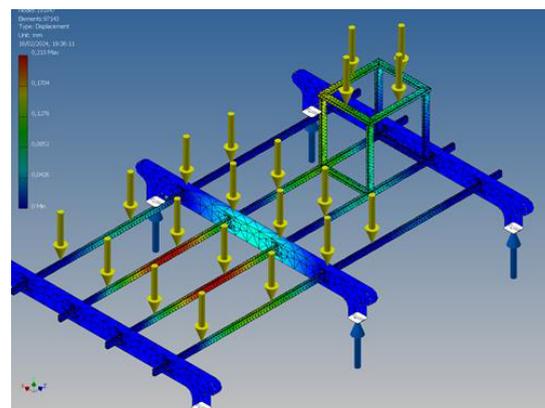
Gambar 8. *Main Effect Plot for Von Mises Stres*

Pada nilai P-value > 0.05, dapat dikatakan bahwa data tersebut berdistribusi

normal. Digunakan uji parametrik ANOVA sehingga diketahui faktor mana yang memberikan efek signifikan terhadap nilai flexural strength dengan tingkat kepercayaan 79% dan alpha 0.05. Desain replikasi nomer 8 dipilih karena memiliki von mises stres yang kecil sehingga memiliki kekuatan beban yang tinggi.

Finite Element Analysis

Pada pengujian *stress analysis* pada replikasi ke 8 didapatkan hasil *von mises stres* sebesar 29,9269 MPa dan *safety factor* sebesar 11,6952. Pada metode FEA diketahui bahwa tegangan terbesar terjadi pada bagian tengah rangka airboat. Desain dikatakan aman karena tidak melebihi tegangan yang diizinkan sebesar 350 MPa.



Gambar 9. *Displacement*

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, maka dapat disimpulkan bahwa faktor material menjadi faktor yang paling menentukan dalam pengujian *stress analysis* menggunakan FEA. Didapatkan spesifikasi *steel carbon, rectangular* dan konfigurasi 3 orang beserta bagasi.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini didukung oleh Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas teknik, Universitas Gadjah Mada. Terimakasih kepada Laboratorium Desain Produk Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.

Daftar Pustaka

- Albiero, D., et al. (2016). Development of low-cost airboats for family farming. *Revista Ciencia Agronomica*, 47(4), 793–804. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160095>
- Broad, et al. (2009). System and method for programming a weighing scale using a key signal to enter a programming mode. United States Patent, 1(12), 14.
- Classification, P. (2013). Patent application publication: US 2013/0148102 A1. Patent Application Publication, 1(19), 7–10.
- Dissanayake, M. C. P., & Gunarathna, T. M. S. (2020). Design of a wind-propelled planning hull craft for shallow water operation. *Proceedings*, 67–74.
- Faango Keribo, I., & Tamunodukobipi, D. (2017). Hydrodynamic characterisation and structural design analyses of an airboat. *American Journal of Mechanical Engineering*, 5(5), 199–204.
- Jankovic, A., Chaudhary, G., & Goia, F. (2021). Designing the design of experiments (DOE): An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. *Energy and Buildings*, 250, 111298. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111298>
- Leppek, A. P. (2012). Optimization of an airboat design.
- Rahaman, S. A. (2014). Design, development, and analysis of advanced airboat propeller by using bamboo composite fibre material. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2(4), 3475–3481.
- Sergis, V., & Ouellet-Plamondon, C. M. (2022). Fractional factorial design to study admixtures used for 3D concrete printing applications. *Materials Letters*, 324, 132697. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132697>
- Yoder, P. R., et al. (2017). Opto-mechanical design process, Fourth Edition: Opto-mechanical systems design: Design and analysis of opto-mechanical assemblies. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18147>