

Optimasi Desain Struktur Kapal Dengan Mempertimbangkan Pemilihan Material via Upgrade & Downgrade Method

GERRY LISTON PUTRA^{1A}, IKO SEPTIYAHARDI¹, ACHMAD RIADI¹, MUHAMMAD ARIF BUDIYANTO¹

ABSTRACT

Dalam pembangunan kapal, baja menjadi material yang paling utama digunakan. Harga baja cenderung meningkat dari waktu ke waktu seiring dengan krisis global. Salah satu cara untuk menurunkan biaya material adalah dengan melakukan optimasi pemilihan material. Pada penelitian ini mengusulkan metode yang mudah untuk melakukan optimasi pemilihan material untuk mendapatkan harga material yang murah. Metode ini bekerja dengan mengganti material yang ketebalannya telah melebihi parameter yang telah ditentukan. Fungsi objektif pada penelitian ini adalah menurunkan biaya material. Jenis dan ketebalan material menjadi variabel desain. Batasan penelitian ini adalah kekuatan dan deformasi yang berdasarkan pada aturan badan klasifikasi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah upgrade & downgrade method. Ada 3 step yang berjalan pada metode ini. Pada step 1 sebagai step awal akan menggunakan material dengan rangking paling rendah sebagai initial design. Hasil dari step 1 akan mengganti material yang memiliki ketebalan melebihi parameter dengan material yang rangkingnya lebih tinggi. Rangkaian material dihasilkan dari perbandingan antara yield strength dengan harga material. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah mild steel, AH 32 dan AH 36. Untuk menguji efektivitas metode ini, dibuatkan 6 kasus dengan perbedaan harga material setiap kasusnya sehingga menghasilkan rangking material yang bervariasi juga. Hasil dari penelitian ini menunjukkan metode ini dapat menurunkan biaya material dari kondisi awal.

Keywords: Optimasi, Upgrade & Downgrade, Material, Biaya

PENDAHULUAN

Tingginya biaya manufaktur karena naiknya harga material merupakan tantangan yang dihadapi oleh galangan kapal (Putra et al., 2019). Optimasi dapat menjadi solusi untuk mengatasi hal ini. Beberapa penelitian terkait optimasi pada kapal telah diterapkan yang dapat dilihat pada Tabel 1. Pada penelitian optimasi akan dilakukan pada struktur. Aspek yang dioptimasi adalah jenis dan ketebalan material. Desain struktur yang terdiri dari pelat dan penegar dijadikan objek pada penelitian ini. Beberapa penelitian yang membahas optimasi struktur dan pemilihan material telah banyak dilakukan. Di industri otomotif pernah dilakukan optimasi pemilihan material untuk mengurangi berat dan dampak terhadap

lingkungan (Poulikidou et al., 2015). Penggunaan material pesawat non-metal untuk body mobil juga menjadi salah satu optimasi pemilihan material yang dapat mengurangi biaya dan berat mobil secara keseluruhan (Hagnell et al., 2020). Di industri galangan kapal optimasi pemilihan material masih belum banyak diterapkan. Oleh karena itu, penelitian tentang optimasi struktur menjadi hal yang menarik dan bermanfaat untuk diterapkan di industri. Penelitian yang dilakukan oleh (Putra & Kitamura, 2021) membuktikan bahwa optimasi pemilihan material, ketebalan dan layout hatch cover menggunakan metode genetic algorithm mampu menurunkan biaya dan massa struktur. Penelitian sejenis juga mengoptimasi jumlah dan jarak stiffener dengan metode genetic algorithm menghasilkan jumlah dan jarak yang optimal dengan harga yang minimal (Putra et al., 2019)

TABEL 1. PENELITIAN OPTIMASI PADA KAPAL

Topik	Judul	Rangkuman
Rute Pelayaran	Liu, H., Deng, R., & Zhang, L. (2016). <i>The application research for ship collision avoidance with hybrid optimization algorithm</i> . 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA).	Optimasi Menggunakan <i>Hybrid Optimization Algorithm</i> untuk <i>Ship Collision Avoidance</i> dan Optimasi Rute
	Wang, S., & Meng, Q. (2012). <i>Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network</i> . <i>Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review</i> , 48(3), 701–714.	Mengoptimalkan konsumsi bahan bakar kapal kontainer berdasarkan histori data kecepatan dan rute pelayaran dengan menggunakan <i>mixed-integer non-linear programming</i> model.
Struktur	Caprace, J.-D., Bair, F., & Rigo, P. (2010). <i>Scantling multi-objective optimization of a LNG carrier</i> . <i>Marine Structures</i> , 23(3), 288–302.	Mengoptimalkan ukuran <i>scantling</i> kapal mempertimbangkan biaya produksi menggunakan metode LBR-5
	Putra, G. L., Kitamura, M., & Takezawa, A. (2019). <i>Structural optimization of stiffener layout for stiffened plate using hybrid GA</i> . <i>International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering</i> .	Optimasi Jarak, jenis dan ketebalan <i>stiffener</i> untuk mengurangi massa struktur
Hambatan	Putra, G. L., & Kitamura, M. (2020). <i>Study on optimal design of hatch cover via a three-stage optimization method involving material selection, size, and plate layout arrangement</i> . <i>Ocean Engineering</i> , 108284.	Pemilihan material, optimasi ketebalan dan optimasi susunan <i>layout</i> untuk mengurangi biaya material
	Putra, G. L., Kitamura, M., & Takezawa, A. (2021). <i>Study on Optimal Design of a Folding-Type Hatch Cover Considering Material Selection</i> <i>Journal of Ship Production and Design</i> .	Optimasi pemilihan material untuk mengurangi berat struktur dan biaya manufaktur
Machinery	Hu, C., Zhou, R., Ma, R., & Gao, Y. (2019). <i>Energy Saving and Optimal Loading Analysis of Ship Trim</i> . 2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing (WCMEIM).	Optimasi tinggi trim untuk meminimalkan hambatan pada kapal <i>Bulk Carrier</i> 82000 DWT
	Le, T.-H., Vu, N. B., Thi, N. H. N., Tran, H., Tran, V. T., & Nguyen, D. A. (2020). <i>Parametric Hull Form Variation-based Genetic Algorithm for Reduced Ship Resistance</i> . 2020 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS)	Menggunakan GA untuk Mengoptimalkan <i>Hull Form Parent Ship</i> untuk meminimalkan <i>Wave</i> dan <i>Friction Resistance</i>
Propulsi	Lai, G., Liu, J., & Zeng, F. (2017). <i>Application of Multi-objective Genetic Algorithm in Ship Shafting Alignment Optimization</i> . 2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID).	Optimasi <i>Shaft Alignment</i> menggunakan <i>Multi-Objective Genetic Algorithm</i>
	Boveri, A., Silvestro, F., & Gualeni, P. (2016). <i>Ship electrical load analysis and power generation optimisation to reduce operational costs</i> . 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference	Optimasi Dimensi dan <i>Load Factor</i> Generator untuk meminimalkan biaya operasional
Propulsi	Pang, S., Lin, Y., Liu, G., & Ren, D. (2020). <i>Multi-objective optimization configuration of electric energy storage capacity of electric propulsion ship</i> . 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference	Optimasi Kapasitas Baterai <i>Lithium</i> pada <i>Electric Propulsion</i> untuk mencapai nilai operasi yang ekonomis dari generator set

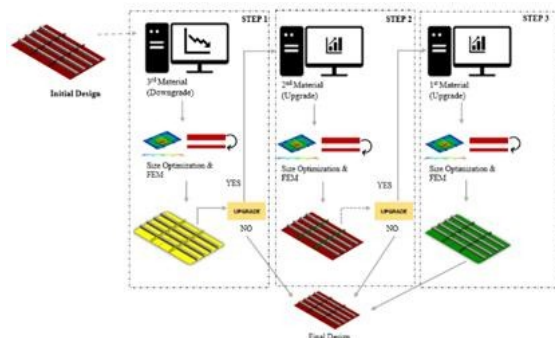
Pada penelitian ini model yang di buat merupakan struktur deck. Struktur *deck* terdiri dari pelat dan *stiffener* serta dibatasi oleh regulasi badan klasifikasi. Jumlah struktur *deck* pada suatu kapal lebih dari satu namun, untuk mengurangi beban komputasi maka hanya dipilih satu bagian saja. Struktur *deck* yang digunakan terdiri dari pelat, *girder* dan

stiffener memanjang. Elemen *shell* digunakan dalam model FEM untuk mengekspresikan pelat dan *girder*, sedangkan elemen *beam* digunakan untuk mengekspresikan *stiffener*.

Singkatnya, tujuan penelitian ini adalah mengurangi biaya material. Penelitian ini mengusulkan metode yang mudah untuk memilih jenis material dan mengoptimasi ketebalan material. Metode yang digunakan dalam penelitian ini disebut *Upgrade & Downgrade Method*. Jenis dan ketebalan material yang dipilih merupakan yang paling ekonomis namun tetap sesuai dengan aturan yang berlaku.

METODE OPTIMASI

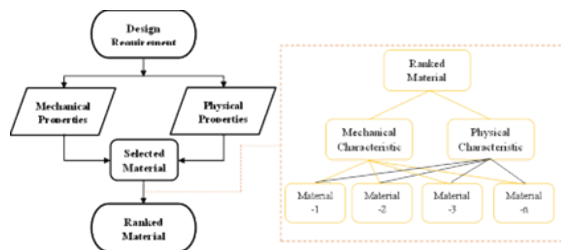
Pada penelitian ini, metode optimasi yang digunakan disebut *upgrade & downgrade method*. Secara ringkas metode ini berjalan dengan mengubah material ke rangking yang lebih tinggi atau lebih rendah ketika material tersebut telah melewati parameter yang ditentukan. Metode ini terdiri dari 3 step. Step pertama adalah *initial design*. Pada step 1 material akan diubah ke material rangking ke-3 lalu dioptimasi ketebalannya sampai mencapai ketebalan optimumnya. Material yang ketebalannya melebihi parameter yang telah ditentukan akan di upgrade menjadi material rangking ke-2 di step 2. Di step ini material akan dioptimasi sampai mencapai ketebalan optimumnya. Material yang ketebalannya melebihi parameter akan di upgrade menjadi material rangking ke-1 di step 3. Di step ini material akan dioptimasi sampai mencapai ketebalan optimumnya dan proses optimasi ini selesai. Dari ketiga step tersebut akan dipilih step mana yang menghasilkan harga material paling murah.



GAMBAR 1. ALUR METODE UPGRADE DAN DOWNGRADE

1. Material Selection

Optimasi pemilihan material merupakan upaya memilih material yang paling optimal dengan kondisi yang sudah ditentukan. Secara umum pemilihan material dipengaruhi oleh berat, kekuatan dan harga material.(Ashby, 2013). Proses pemilihan matrial diterapkan dalam penelitian ini untuk memilih material pelat berdasarkan fungsi tujuan yang diinginkan, yang meminimalkan biaya material. Industri perkapalan didorong untuk merancang kapal ringan untuk mengurangi biaya produksi.



GAMBAR 2. PROSES MATERIAL SELECTION

2. Optimasi Ketebalan

Optimasi ketebalan merupakan upaya untuk mendapatkan ketebalan yang optimal pada batas kekuatan yang telah ditentukan. Optimasi ketebalan dilakukan dengan menggunakan *size optimization* berdasarkan persamaan yang menyatakan hubungan antara *bending moment, axial force, plate thickness* dan *stress*.(Putra et al., 2019)

$$t_{\sigma_{bd}}^{a+1} = t^a \sqrt{\frac{\sigma_{\sigma_{bd}}^a}{\sigma_c}} \quad (1)$$

$$t_{\sigma_{sh}}^{a+1} = t^a \frac{\sigma_{sh}^a}{\sigma_c} \quad (2)$$

$$t_{\sigma_{bc}}^{a+1} = t^a \frac{\sigma_{bc}^a}{\sigma_c} \quad (3)$$

$$t^{a+1} = \max(t_{\sigma_{bd}}^{a+1}, t_{\sigma_{sh}}^{a+1}, t_{\sigma_{bc}}^{a+1}) \quad (4)$$

MODEL KASUS

1. Rancangan Awal

Rancangan awal berupa desain awal yang akan dioptimasi. Rancangan awal ini akan diubah menjadi nilai yang lebih baik melalui proses optimasi. Proses perubahan rancangan awal tetap mengacu pada *Rules* yang berlaku. Berikut merupakan rancangan awal struktur.

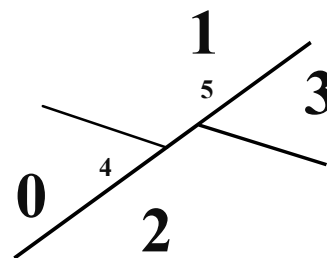
TABEL 2. RANCANGAN AWAL STRUKTUR

No.	Struktur	Material	Ketebalan (mm)
1	Pelat 0	MS	12
2	Pelat 1	MS	12
3	Pelat 2	MS	12
4	Pelat 3	MS	12
5	Pelat 4	MS	12
6	Pelat 5	MS	12

TABEL 3. SPESIFIKASI STRUKTUR

Item	Satuan	Desain Awal
L (Panjang)	mm	5000
W (Lebar)	mm	3000
H (Tinggi)	mm	200
Beban	N/mm ²	0.0343
Jenis Material	-	MS
Massa Jenis	Kg/m ³	7800
Ukuran	mm ²	2921
Stiffener		

Dari rancangan awal struktur didapatkan harga total rata-rata material adalah Rp.12.888.720. Harga material ini akan berpengaruh pada seluruh biaya pembangunan kapal. Material MS,AH 32 dan AH 36 dipilih pada penelitian ini karena material jenis *carbon steel* ini umum digunakan pada kapal. Material yang digunakan adalah material *grade A*.



GAMBAR 3. SUSUNAN MATERIAL STRUKTUR DEK

2. Studi Kasus

Untuk menguji efektifitas metode ini dibuat 6 kasus yang diambil dengan perbedaan harga pada setiap kasusnya. Terlihat pada Tabel 4.

TABEL 4. PERBEDAAN HARGA SETIAP KASUS

Material	Harga (Rp/Kg)						ReH
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	
MS	8000	8000	9000	10000	7000	9000	188
AH32	11000	9000	10000	10000	10000	13000	252
AH36	12000	12000	11000	10000	12000	14000	284

Dari tabel 4 akan dihitung perbandingan *yield strenght* terhadap harga material untuk menentukan rangking material pada setiap kasus harga.

$$R_{eH} \text{ to price ratio} = \frac{\text{Yield Strenght}}{\text{Price (Rp)}} \quad (5)$$

TABEL 5. REH TO PRICE RATIO

Material	ReH to Price ratio					
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
MS	0.0235	0.0235	0.0209	0.0188	0.0269	0.0209
AH32	0.0229	0.0280	0.0252	0.0252	0.0252	0.0194
AH36	0.0237	0.0237	0.0258	0.0284	0.0237	0.0203

Dari hasil tabel 5 akan di rangking sesuai nilai dari nilai terkecil ke terbesar. Rangking ini akan menentukan pergantian material dalam proses optimasi. Material rangking ke-3 akan terpilih paling pertama dilanjutkan material rangking ke -2 sampai ke-1. Material akan diganti ketika ketebalannya telah melewati parameter yang telah ditentukan. Rangking dan parameter dapat dilihat pada tabel 6.

TABEL 6. RANKING DAN BATAS KETEBALAN MATERIAL

Case 1	Batas t (mm)	Case 2	Batas t (mm)	Case 3	Batas t (mm)
AH36	6	AH32	8	AH36	6
MS	9	AH36	6	AH32	6.6
AH32	6.55	MS	9	MS	7.33
Case 4	Batas t (mm)	Case 5	Batas t (mm)	Case 6	Batas t (mm)
AH36	6	MS	10.29	MS	9.33
AH32	6	AH32	7.2	AH36	6
MS	6	AH36	6	AH32	6.46

Batas ketebalan ini ditentukan untuk menghasilkan harga material yang sama. Sebagai contoh pada case 1 AH 36 dengan ketebalan 6 mm harganya sama dengan MS ketebalan 9 mm dan AH 32 ketebalan 6.55 mm seperti yang terlihat pada Tabel 7 dibawah ini.

TABEL 7. PERBANDINGAN HARGA MATERIAL

Material	Tebal* (mm)	Harga (Rp/Kg)	Total
AH36	6	12.000	72.000
MS	9	8.000	72.000
AH32	6.55	11.000	72.000

*per mm = 1 kg

3. Variabel Desain

Pada penelitian ini variabel desain pada optimasi yaitu jenis material dan ketebalan pelat untuk pelat 0 – pelat 5. Jenis material berpengaruh terhadap biaya manufaktur kapal dan ketebalan berpengaruh pada harga material yang dipakai.

Pada proses optimasi ini data awal yaitu *initial design* berupa jenis material dan ketebalan pelat. Terdapat 6 pelat *Initial design* yaitu material *mild steel* dengan ketebalan 12 mm sesuai kondisi awal. Setelah tahap awal selesai selanjutnya dilakukan optimasi ketebalan menggunakan FEM dengan batas *yield strenght* material. Hasilnya berupa ketebalan baru pada beberapa atau semua pelat. Pelat dengan ketebalan di atas parameter yang telah ditentukan akan di *upgrade* jenis materialnya menjadi material yang secara rangking lebih tinggi. Setelah itu akan dilakukan optimasi ketebalan seperti langkah sebelumnya dan material akan di *upgrade* lagi jenis materialnya menjadi material yang rangkingnya lebih tinggi lagi jika ada pelat yang ketebalannya di atas parameter yang telah ditentukan. Rangking material diurutkan berdasarkan perbandingan harga dan *yield strenght*. Parameter yang menjadi acuan dapat dilihat pada table 6.

4. Fungsi Objektif

Untuk biaya material dapat dikurangi dengan memilih jenis material yang paling ekonomis dan mengoptimalkan ketebalan material tersebut seperti yang terlihat pada persamaan 6.

$$\text{Min } f(t, C) = \sum_{i=0}^{n-1} t_i l b \rho C \quad [\text{Rp}] \quad (6)$$

ket :

- n : jumlah pelat
- l : panjang pelat (mm)
- b : lebar pelat (mm)
- ρ : massa jenis material (kg/mm³)
- t_i : ketebalan pelat (mm)
- C : harga material pelat (Rp/kg)

5. Kondisi Batas

Pemilihan kondisi batas pada penelitian ini yaitu mengikuti *Rules* yang berlaku untuk

struktur *deck*. Kondisi batas penelitian ini mengikuti rekomendasi dari *IACS Common Structural Rules* (IACS, 2012). Batasan yang diterapkan sebagai berikut :

$$\sigma_{\max} \leq 0.8 R_{eH} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (7)$$

$$\sigma_{sh} \leq 0.46 R_{eH} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (8)$$

Pada persamaan (7) σ_{\max} melambangkan tegangan maksimum pada struktur dan R_{eH} melambangkan *yield strength* dari material yang bernilai 235 N/mm² untuk MS, 315 N/mm² untuk AH32 dan 355 N/mm² untuk AH 36. Sebagai tambahan pada persamaan (8) σ_{sh} melambangkan *shear stress* pada struktur.

HASIL DAN DISKUSI

Penelitian ini mengusulkan metode *Upgrade & Downgrade* untuk mengoptimasi pemilihan dan ketebalan material dengan mudah. Dalam penelitian ini terdapat 3 langkah proses optimasi sampai menghasilkan hasil yang optimal. Jumlah langkah ini tergantung daripada jumlah jenis material yang digunakan dalam penelitian. Tabel 8 – 13 menampilkan perubahan material dari kondisi *initial design* sampai ke langkah ke-3. Pada ketiga langkah yang terjadi akan dipilih hasil dari salah satu langkah yang menghasilkan desain paling optimal dari segi harga. Visualisasi perubahan material dapat dilihat pada gambar 4.

TABEL 8. PERUBAHAN MATERIAL PADA CASE 1

Perubahan material				
No.	Initial Design	Step 1	Step 2	Step 3
0	MS	AH 32	AH 32	AH 32
1	MS	AH 32	AH 32	AH 32
2	MS	AH 32	AH 32	AH 32
3	MS	AH 32	AH 32	AH 32
4	MS	AH 32	MS	AH 36
5	MS	AH 32	MS	AH 36

TABEL 9. PERUBAHAN MATERIAL PADA CASE 2

Perubahan material				
No.	Initial Design	Step 1	Step 2	Step 3
0	MS	MS	MS	MS

1	MS	MS	MS	MS
2	MS	MS	MS	MS
3	MS	MS	MS	MS
4	MS	MS	AH 36	AH 32
5	MS	MS	AH 36	AH 32

TABEL 10. PERUBAHAN MATERIAL PADA CASE 3

Perubahan material				
No.	Initial Design	Step 1	Step 2	Step 3
0	MS	MS	MS	MS
1	MS	MS	MS	MS
2	MS	MS	MS	MS
3	MS	MS	MS	MS
4	MS	MS	AH 32	AH 36
5	MS	MS	AH 32	AH 36

TABEL 11. PERUBAHAN MATERIAL PADA CASE 4

Perubahan material				
No.	Initial Design	Step 1	Step 2	Step 3
0	MS	MS	AH 32	AH 36
1	MS	MS	AH 32	AH 36
2	MS	MS	AH 32	AH 36
3	MS	MS	AH 32	AH 36
4	MS	MS	AH 32	AH 36
5	MS	MS	AH 32	AH 36

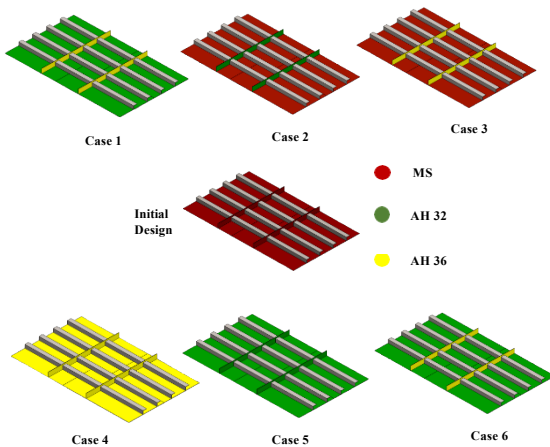
TABEL 12. PERUBAHAN MATERIAL PADA CASE 5

Perubahan material				
No.	Initial Design	Step 1	Step 2	Step 3
0	MS	AH 36	AH 32	AH 32
1	MS	AH 36	AH 32	AH 32
2	MS	AH 36	AH 32	AH 32
3	MS	AH 36	AH 32	AH 32
4	MS	AH 36	AH 32	MS
5	MS	AH 36	AH 32	MS

TABEL 13. PERUBAHAN MATERIAL PADA CASE 6

Perubahan material				
No.	Initial Design	Step 1	Step 2	Step 3
0	MS	AH 32	AH 32	AH 32
1	MS	AH 32	AH 32	AH 32
2	MS	AH 32	AH 32	AH 32
3	MS	AH 32	AH 32	AH 32
4	MS	AH 32	AH 36	MS
5	MS	AH 32	AH 36	MS

Pada tabel 7-12 dapat dilihat bahwa untuk semua kasus, semua material berubah ke material yang lebih tinggi rangkingnya pada setiap step perhitungan. Pada step 1 pada semua kasus, material berubah menjadi material rangking 3. Untuk step 2 tidak semua material berubah. Seperti pada kasus 1,2,3 dan 6 hanya pada material 4 dan 5 yang mengalami perubahan jenis material. Itu disebabkan karena pada material 0 sampai 3 sudah optimal dan tidak membutuhkan perubahan. Sementara pada kasus 4 dan 5 semua material berubah. Ini disebabkan karena semua material pada step 1 di kasus 4 dan 5 masih belum memenuhi parameter optimasi yang ditentukan sehingga harus di *upgrade*. Untuk step 3 tidak semua material berubah. Pada kasus 1,2,3,5 dan 6 hanya material 4 dan 5 yang mengalami perubahan. Ini di sebabkan karena material 0 sampai 3 sudah optimal sehingga tidak membutuhkan *upgrade* lagi. Secara keseluruhan terdapat perubahan jenis material dari rancangan awal dan rancangan yang sudah di optimasi. Untuk optimal *design* dari setiap kasus dan perubahan materialnya dapat dilihat pada gambar 4.

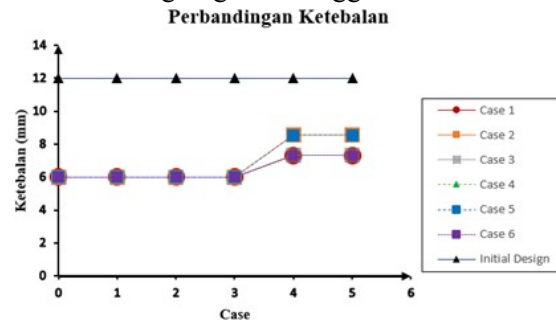


GAMBAR 4. VISUALISASI PERUBAHAN MATERIAL

1. Perubahan Ketebalan Material

Dapat dilihat pada gambar 5 bahwa ketebalan material 4 dan 5 berkurang pada kasus 3 dan 4 setiap stepnya. Pada semua kasus material 0 sampai 3 sudah mencapai batas minimumnya 6 mm pada step 1 hingga step 3 sehingga material 4 dan 5 saja yang mengalami perubahan ketebalan lagi pada step berikutnya. Pada selain kasus 3 dan 4 material 4 dan 5 mengalami perubahan yang tidak tetap. Pada kasus 1,2,5 dan 6 material 3 dan 4 mengalami perubahan naik turun ketebalannya. Ini sebabkan

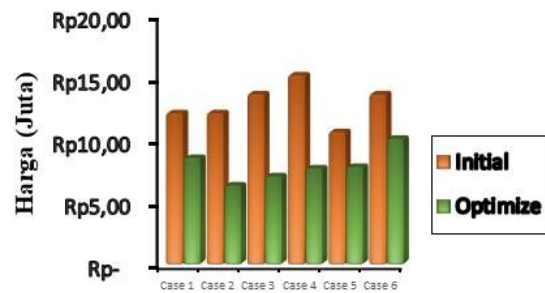
karena perankingan material yang menempatkan material *grade* lebih rendah berada di rangking lebih tinggi.



GAMBAR 5. PERUBAHAN KETEBALAN

2. Perubahan Biaya dan Massa

Perubahan biaya dan massa dapat dilihat pada gambar 6 dan gambar 7 dibawah ini.



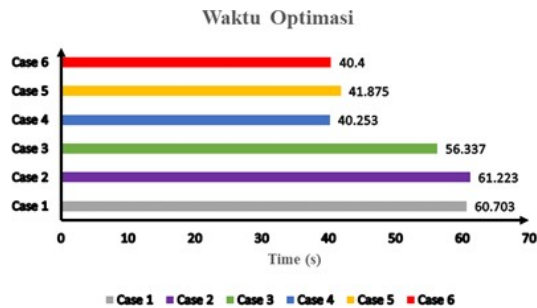
GAMBAR 6. PERUBAHAN BIAYA MATERIAL



GAMBAR 7. PERUBAHAN MASSA

Berdasarkan Gambar 6 diatas biaya material pada kondisi optimal *design* mengalami penurunan dari kondisi *initial design*. Pada kasus 1 biaya material mengalami penurunan sebesar 29,5 %. Pada kasus 2 biaya material turun sebesar 47.7 %. Pada kasus 3 biaya material juga mengalami penurunan sebesar 48.1 %. Pada kasus 4 biaya material berkurang sebesar 49.1 %. Pada kasus 5 biaya material turun sebesar 26.3 %. Dan pada kasus 6 biaya material mengalami penurunan sebesar 26.1 %.

Berdasarkan grafik pada Gambar 7 massa material setelah dilakukan optimasi mengalami pengurangan dari desain awal. Pada kasus 1,3,4 dan 6 massa material menjadi 770.4 kg atau berkurang sebesar 48.43%. Secara keseluruhan pada kondisi optimalnya yaitu biaya paling minimum, massa material berkurang dari massa desain awal.



GAMBAR 8. WAKTU OPTIMASI

Berdasarkan grafik di atas rata-rata waktu optimasi adalah 50,1 detik. Dengan rincian pada kasus 1 60.7 detik, kasus 2 61.2 detik, kasus 3 56.3 detik, kasus 4 40.2 detik, kasus 5 41.8 detik dan kasus 6 40.4 detik. Lama dari waktu optimasi dipengaruhi oleh perbedaan harga material. Semakin jauh perbedaan harganya semakin cepat waktu optimasinya dan sebaliknya.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa material dengan *grade* tinggi tidak selalu menjadi pilihan terbaik sebagai material kapal guna mengurangi harga material. Harga akhir material dipengaruhi oleh rangking material yang berdasarkan perbandingan harga dan *yield strength* material.

Optimasi dengan menggunakan *Up & Downgrade Method* mampu menurunkan biaya material struktur kapal tanpa mengurangi kekuatan struktur kapal itu sendiri.

DAFTAR PUSTAKA

Ashby, M. F. (2013). Material selection strategies. *Materials and the Environment*, 227–273. [https://doi.org/10.1016/b978-0-12-](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385971-6.00009-9)

385971-6.00009-9

Gebisa, A. W., & Lemu, H. G. (2017). A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 276(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/276/1/012026>

Putra, G. L., Kitamura, M., & Takezawa, A. (2019). *Constrained Thickness Optimization of Multi-Material Plate*. May 2018.

Sofi'i, M., & Djaja, I. K. (2008). Teknik Konstruksi Baja Kapal. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9).

Venkataraman, P. (2010). Applied Optimization with MATLAB Programming. *Synthesis Lectures on Human Language Technologies*, 3, 1–187.

Bakhtary, N., Allinger, P., Friedrich, M., Mulfinger, F., Sauter, J., Müller, O., & Puchinger, M. (1996). A new approach for sizing, shape and topology optimization. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/960814>

Chanakya Chervith, P. S. M., Abhilash, P., & Chandrasekhar, A. (2018). Optimizing the tool life of a hybrid material using genetic algorithm. *Materials Today: Proceedings*, 5(13), 27199–27204. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.09.032>

Colak, O. U., & Cakir, Y. (2019). Material model parameter estimation with genetic algorithm optimization method and modeling of strain and temperature dependent behavior of epoxy resin with cooperative-VBO model. *Mechanics of Materials*, 135(March), 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2019.04.023>

Ermolaeva, N. S., Kaveline, K. G., & Spormaker, J. L. (2002). Materials selection combined with optimal structural design: Concept and some results. *Materials and Design*, 23(5), 459–470. [https://doi.org/10.1016/s0261-3069\(02\)00019-5](https://doi.org/10.1016/s0261-3069(02)00019-5)

Hagnell, M. K., Kumaraswamy, S., Nyman, T., & Åkermo, M. (2020). From aviation to automotive - a study on material selection and its implication on cost and weight efficient structural composite and

- sandwich designs. *Heliyon*, 6(3), e03716. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03716>
- Hu, C., Zhou, R., Ma, R., & Gao, Y. (2019). Energy saving and optimal loading analysis of ship trim. *Proceedings - 2019 2nd World Conference on Mechanical Engineering and Intelligent Manufacturing, WCMEIM 2019*, 50–53. <https://doi.org/10.1109/WCMEIM48965.2019.00017>
- Kanniyapan, G., Nesan, L. J., Mohammad, I. S., Tan, S. K., & Ponniah, V. (2019). Selection criteria of building material for optimising maintainability. *Construction and Building Materials*, 221, 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.108>
- Karande, P., & Chakraborty, S. (2012). Application of multi-objective optimization on the basis of ratio analysis (MOORA) method for materials selection. *Materials and Design*, 37, 317–324. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.013>
- Lai, G., Liu, J., & Zeng, F. (2018). Application of multi-objective genetic algorithm in ship shafting alignment optimization. *Proceedings - 2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design, ISCID 2017*, 2, 275–278. <https://doi.org/10.1109/ISCID.2017.109>
- Le, T. H., Vu, N. B., Thi, N. H. N., Tran, H., Tran, V. T., & Nguyen, D. A. (2020). Parametric Hull Form Variation-based Genetic Algorithm for Reduced Ship Resistance. *International Conference on Advanced Mechatronic Systems, ICAMechS, 2020-December*, 255–259. <https://doi.org/10.1109/ICAMechS49982.2020.9310110>
- Liu, H., Deng, R., & Zhang, L. (2017). The application research for ship collision avoidance with hybrid optimization algorithm. *2016 IEEE International Conference on Information and Automation, IEEE ICIA 2016, 2013*, 760–767. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2016.7831921>
- Liu, Z., Cho, S., Takezawa, A., Zhang, X., & Kitamura, M. (2019). Two-stage layout-size optimization method for prow stiffeners. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.01.001>
- PERPRES_16_Tahun_2017_Kebijakan Kelautan.pdf. (n.d.).
- Poulikidou, S., Schneider, C., Björklund, A., Kazemahvazi, S., Wennhage, P., & Zenkert, D. (2015). A material selection approach to evaluate material substitution for minimizing the life cycle environmental impact of vehicles. *Materials and Design*, 83, 704–712. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.079>
- Putra, G. L., & Kitamura, M. (2021a). Study on optimal design of hatch cover via a three-stage optimization method involving material selection, size, and plate layout arrangement. *Ocean Engineering*, 219(May 2020), 108284. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108284>
- Putra, G. L., & Kitamura, M. (2021b). Study on optimal design of hatch cover via a three-stage optimization method involving material selection, size, and plate layout arrangement. *Ocean Engineering*, 219(May), 108284. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108284>
- Putra, G. L., & Kitamura, M. (2021c). Study on optimal design of hatch cover via a three-stage optimization method involving material selection, size, and plate layout arrangement. *Ocean Engineering*, 219(00), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108284>
- Putra, G. L., Kitamura, M., & Takezawa, A. (2019). Structural optimization of stiffener layout for stiffened plate using hybrid GA. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 11(2), 809–818. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.03.005>
- Ren, L., & Diao, Y. (2014). Matching optimization of ship engine propeller and net for the trawler based on genetic algorithm. *2014 10th International Conference on Natural Computation, ICNC 2014*, 3(2), 617–621. <https://doi.org/10.1109/ICNC.2014.6975906>
- Zhao, X., & Fan, X. (2009). A method based

on genetic algorithm for anti-ship missile path planning. *Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization, CSO 2009*, 2(3), 156–159. <https://doi.org/10.1109/CSO.2009.370>

Zou, W., Liu, T., & Shi, Y. (2021). Optimization of the maximum range of supercavitating vehicles based on a genetic algorithm. *Ocean Engineering*, 239(September), 109892. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109892>

PENULIS:

¹Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok Jawa Barat, Indonesia
gerrylp@eng.ui.ac.id