

OPTIMASI DESAIN TOPOLOGI STRUKTUR BOOM EXCAVATOR CAT 374D L DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Dwiki Putratama Nugraha^{*}, Sumar Hadi Suryo^{a,**}, Muchammad^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: dwikiputra2018@student.undip.ac.id; **E-mail: sumarhs.undip@gmail.com

Abstrak

Salah satu jenis alat berat yang terbuat dari mesin di atas roda khusus yang dilengkapi dengan *arm*, *boom* dan *bucket* merupakan excavator. *Excavator* dipergunakan untuk menggali atau mengangkut suatu material seperti tanah, batubara, pasir, dan lain-lain. Pada excavator terdapat satu komponen yang berperan penting dalam fungsinya tersebut adalah *boom*. Penelitian kali ini membahas mengenai perancangan optimasi pada *boom* yang menghasilkan suatu desain dengan mengurangi berat tetapi tetap mempertahankan kekuatannya, *boom* yang digunakan merupakan *Caterpillar 374D L*. Optimasi pada *boom* menerapkan konsep optimasi berupa optimasi topologi. Metode yang dilakukan menggunakan analisis linear static dengan penerapan metode elemen hingga sehingga tegangan maksimum yang terjadi pada *boom* dapat diketahui. Untuk menentukan besar tegangan von mises dilakukan dengan 3 variasi yaitu posisi jangkauan tinggi maksimum, jangkauan datar maksimum, dan jangkauan kedalaman maksimum. *Von Mises* terbesar 470,5 MPa pada posisi jangkauan tinggi maksimum. Proses optimasi topologi, pertama dengan memilih variasi area desain kemudian di ambil 2 variasi desain. Hasil yang didapat setelah dilakukan optimasi topologi yaitu tegangan maksimum vonmises pada variasi 1 sebesar 473,9 MPa, sedangkan untuk variasi 2 sebesar 478,7 MPa. Setelah di optimasi didapatkan *boom* dengan reduksi massa dalam variasi pertama sebesar 193 kg dan pada variasi kedua 214 kg.

Kata kunci: boom; metode elemen hingga; optimasi topologi

Abstract

One type of heavy equipment made from a special engine on wheels with arm, boom and bucket is an excavator. Excavator are used to excavate or transport material such as soil, coal, sand, and others. There's a component in the excavator that play a crucial role in its function: boom. The research discusses the optimization design on the boom that produces a design by reducing weight but maintaining strength, the adused boom was the caterwayor 374D L. The optimization of boom utilizes the optimization of topology. The method used linear static analysis with the application of element methods up to the maximum voltage that occurs in boom can be known. To determine the magnitude of vonmises voltage there are three variations, maximum high-range position, maximum flat range, and maximum depth range. The largest von mises is 470.5 mpa at maximum range. The topology optimization process, first by choosing the area variations and then two design variations. The result of a topology optimization is the maximum voltage of vonmises on variations 1 of 473.9 mpa, whereas of variations 2 of 478.7 mpa. After optization, boom with mass reduction in the first variation of 193 kg and the second variation 214 kg.

Keywords: boom; finite element method; topology optimization

1. Pendahuluan

Excavator ada beberapa jenis mulai dari jenis *crawler* dan roda karet. *Excavator hydraulic* terdiri dari tiga bagian utama: *undercarriage*, *upper structure*, dan *upper structure* pada *undercarriage*. Perangkat kerja pada *excavator* terdiri dari *boom*, *arm*, *bucket*, *arm cylinder*, *boom cylinder*, dan *bucket cylinder* [1]. Sistem pendukung *excavator* seperti yang dijelaskan sebelumnya, salah satunya adalah *boom*. Untuk menentukan tegangan dari *Excavator*, dapat dianalisa gaya reaksi pada variasi posisi mengangkat beban. Hasil analisa tersebut digunakan sebagai evaluasi atau optimasi kerja excavator dinilai terhadap keandalannya sesuai dengan spesifikasi kebutuhan dalam dunia konstruksi. Beberapa komponen *Excavator* perlu adanya *maintenance* setelah digunakan dalam masa pakai, hal ini dapat mengakibatkan biaya operasional meningkat [2]. Maka dari itu penulis melakukan optimasi desain pada *boom excavator* untuk membahas salah satu permasalahan yang ada pada *boom excavator* dan melakukan analisa gaya reaksi pada saat digging..

Dalam penelitian ini perancangan desain menggunakan pendekatan dari desain asli. Untuk *properties* material yang akan diinput dalam simulasi, penulis merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Bhaveshkumar yang menjelaskan bahwa material *boom excavator* yang dia analisis adalah Hardox 400 [3]. Dalam simulasi ini digunakan metode linear statik untuk proses FEM.

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Identifikasi Material

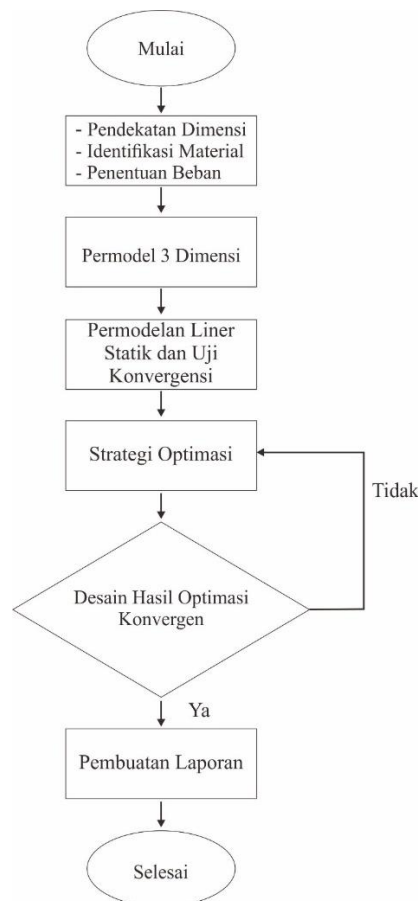
Pada penelitian ini, penentuan material *boom excavator* yang digunakan merujuk pada penelitian Bhaveshkumar yang membahas tentang karakterisasi material pada *boom excavator* yaitu Hardox 400 [3]. Data-data yang diperoleh dari penelitian tersebut diperlukan dalam proses optimasi desain *boom excavator* kali ini. Data tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Data Karakteristik material Hardox 400 [4]

No.	Data karakteristik Hardox 400	Nilai
1	Modulus Elastisitas (E)	210000 Pa
2	<i>Poisson Ratio</i>	0.29
3	Massa Jenis	7473.57
4	<i>Yield Strength</i>	1000 MPa

2.2 Diagram Alir

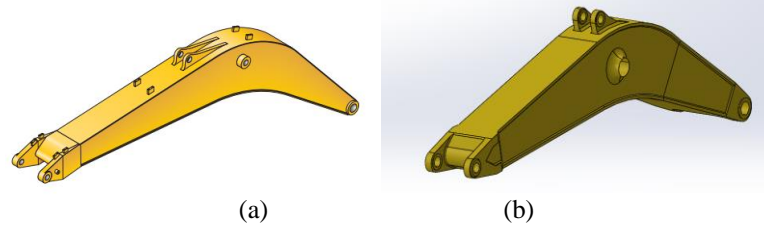
Pada penelitian ini terdapat langkah-langkah simulasi linear statik dan optimasi *boom excavator* yang mengacu pada diagram alir Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir

2.3 Proses Permodelan 3D *Boom Excavator*

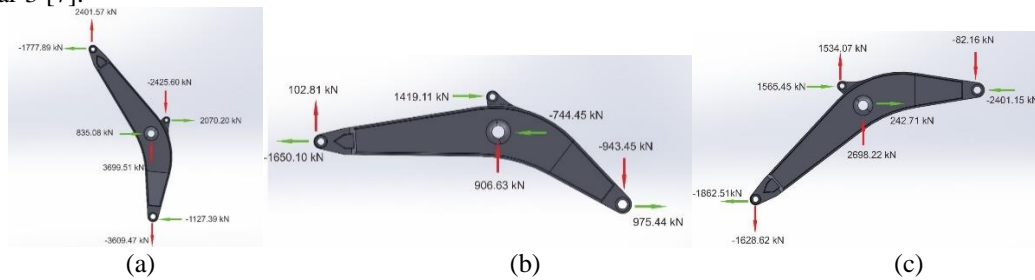
Boom excavator yang dipakai dalam penelitian ini adalah *boom excavator* CAT 374D L seperti pada Gambar 2 (a). Pembuatan desain *boom excavator* menggunakan *software* CAD dengan menggunakan pendekatan dari desain aslinya. Pada Gambar 2 (b) diperoleh hasil desain 3D *boom excavator*. *Software* CAD yang digunakan untuk memodelkan adalah Solidworks 2016.



Gambar 2. Desain *boom excavator*, (a) CAT 374D L, (b) Hasil Desain CAD

2.4 Pemodelan linear statik

Permodelan linear statik dipengaruhi oleh suatu gaya yang bekerja pada *arm excavator*. Pada penelitian ini gaya diperoleh dari *bucket digging force* (F_b) [5]. *Excavator* yang digunakan adalah CAT 374D L dengan *bucket digging force* sebesar 297500 N [6]. Menggunakan perhitungan dari *bucket*, *arm*, dan *boom* dapat diperoleh reksi gaya dan arahnya sesuai dengan beban yang diberikan. Hasil reaksi gaya dan arah gaya menggunakan tiga variasi konfigurasi posisi seperti pada gambar 3 [7].



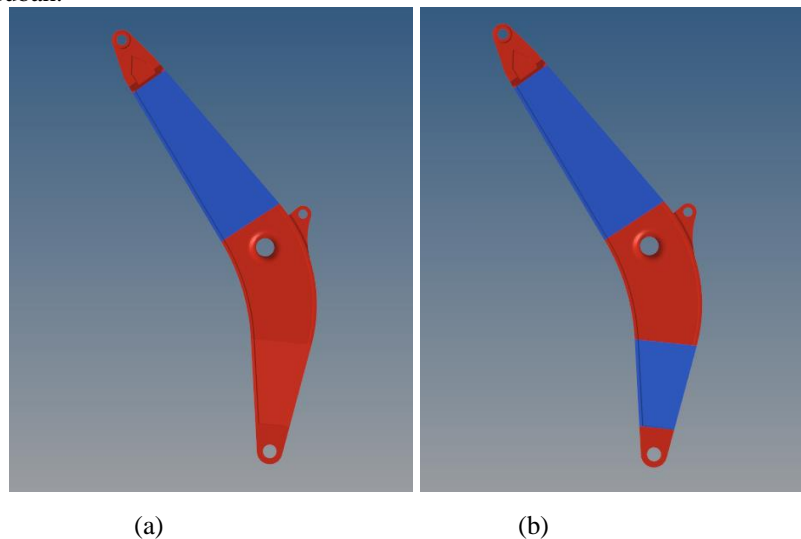
Gambar 3. Reaksi gaya dan arah gaya, (a) posisi jangkauan ketinggian maksimum, (b) posisi jangkauan datar maksimum, dan (c) posisi jangkauan kedalam

2.5 Proses Optimasi

Metode optimasi yang digunakan merupakan optimasi topologi menggunakan perangkat lunak altair *optistruct* [8]. Pada desain *boom excavator* dilakukan optimasi topologi dikarenakan bentuknya merupakan struktur 3D *continuum* dan optimasi topologi menghasilkan pengurangan massa yang lumayan besar. Berikut ini adalah langkah-langkah menentukan strategi optimasi topologi:

1) Menentukan *design variable*

Penentuan *design variable* bertujuan untuk menentukan bagian dari desain yang dapat diubah secara optimal. Warna merah menunjukkan *design variable* sedangkan warna putih menunjukkan bagian *non-design variables* atau daerah yang tidak bisa dirubah.



Gambar 4. (a) *Design variable 1* (b) *design variable 2*

2) Menentukan *Constraint*

Desain *constraint* merupakan batasan yang terikat dengan respon agar hasil optimasi bisa diterima. Pada optimasi ini desain *constraint* berupa *volume fraction* sebesar 70%.

3) Menentukan Respon Struktur

Respon merupakan perhitungan performa sistem yang kita tentukan sesuai dengan *constraint* dan *objective* dari apa yang akan kita tentukan. Pada proses optimasi ini respon yang digunakan berupa *weight compliance* dan *volume fraction*.

4) Menentukan *Objective*

Objective merupakan tujuan setiap fungsi respon yang akan dioptimalkan, responnya merupakan variabel dari desainnya. Pada optimasi ini objektifnya berupa *minimize weight compliance*.

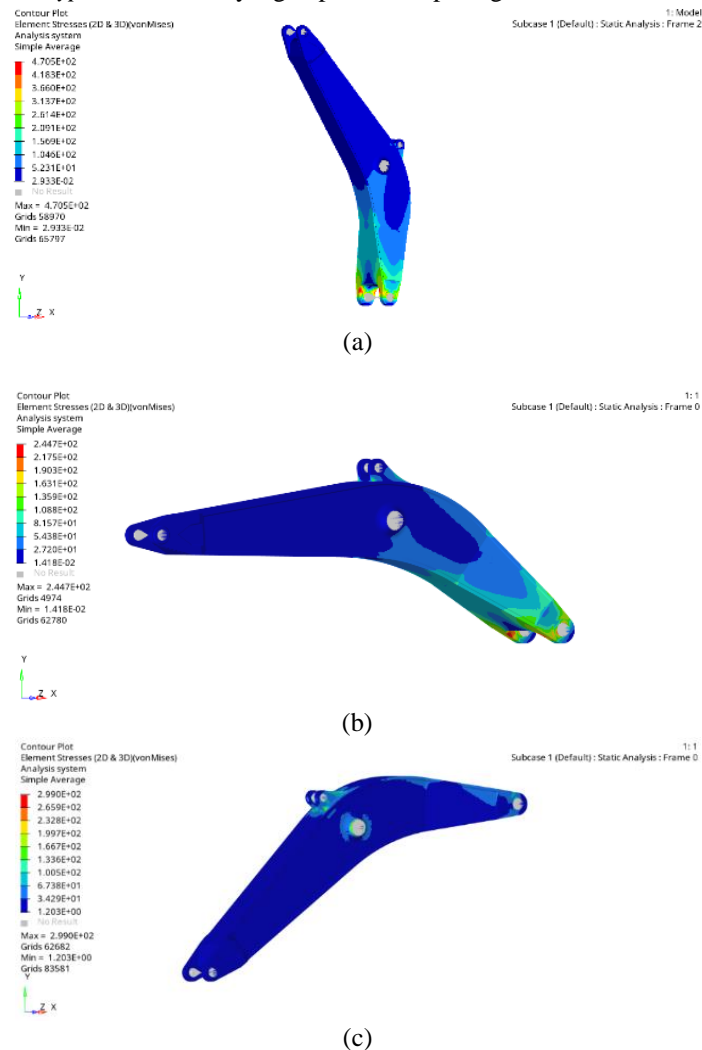
5) Menentukan *Manufacturing Constraint*

Kekhawatiran dalam optimasi topologi adalah konsep desain dikembangkan sering tidak dapat diproduksi. *Optistruct* menawarkan sejumlah metode berbeda untuk memperhitungkan kemampuan manufaktur ketika melakukan optimasi topologi. Oleh karena itu *manufacturing constraint* harus ditentukan agar hasil optimasi dapat di manufaktur, dengan cara menentukan *Minimum member size control* digunakan untuk menentukan dimensi terkecil yang harus dipertahankan dalam desain topologi. Pada penelitian ini ditentukan nilai *minimum member size control* senilai 0,20 mm.

3 Hasil Dan Pembahasan

3.1 Hasil Simulasi Linear Statik

Untuk mengetahui apakah material yang digunakan tidak mengalami kegagalan dan dapat dioptimasi dilakukan analisa linear statik untuk mendapatkan nilai vonMises dari suatu desain dengan material yang didapatkan dari hasil identifikasi [9]. Hasil tegangan VonMises dari tiga konfigurasi posisi *boom* dapat ditentukan dengan simulasi linear static menggunakan software *Altair Hyperworks 2019* yang dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Nilai Tegangan VonMises pada *boom excavator* Cat 375 DL (a) posisi jangkauan ketinggian maksimum, (b) posisi jangkauan datar maksimum, dan (c) posisi jangkauan kedalam

Dari tiga konfigurasi posisi didapat hasil tegangan VonMises terbesar pada posisi jangkauan ketinggian maksimum sebesar 470,5 MPa.

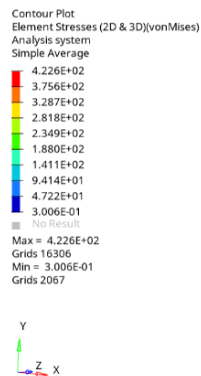
3.2 Hasil Uji Kovergensi

Untuk menentukan jumlah elemen yang sesuai untuk dilanjutkan dengan proses optimasi dilakukan uji konvergensi terlebih dahulu [10] yang dapat dilihat pada Tabel 2 sampai didapat hasil yang konvergen pada setiap kenaikan elemen dengan melakukan perbaikan *mesh* secara bertahap dan pada daerah tertentu.

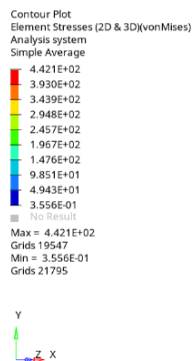
Tabel 2. Nilai tegangan maksimum vonMises tiap elemen

No	Tegangan Maksimum (MPa)	Jumlah Elemen
1	422.6	65533
2	442.1	79725
3	454.9	102135
4	469.7	133722
5	470.5	367762

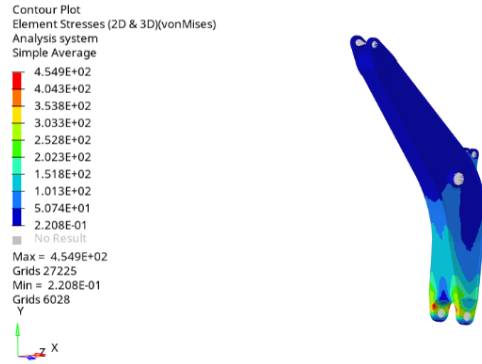
Berdasarkan variasi kenaikan elemen pada Tabel 2 diatas, dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah elemen, nilai tegangan VonMises tidak mengalami perubahan yang signifikan. Hal ini menandakan nilai tegangan VonMises sudah konvergen. Pada penelitian ini menggunakan elemen paling banyak pada hasil uji konvergensi ke-5, yaitu 278846. Berikut ini adalah gambar distribusi tegangan yang terjadi pada *boom excavator*.



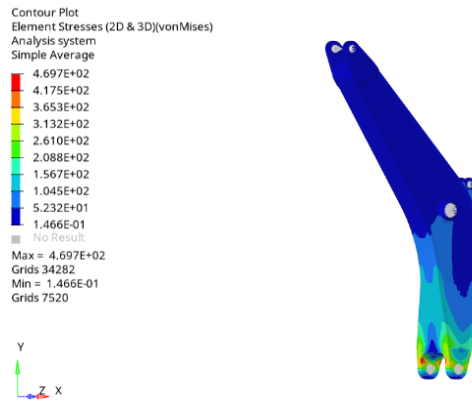
(a)



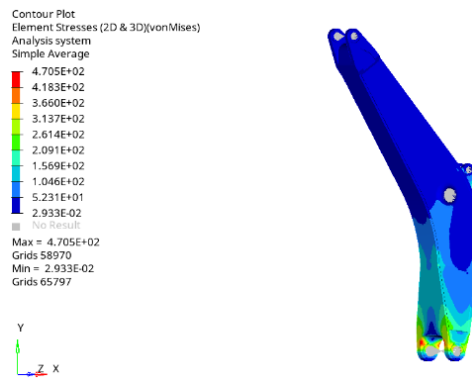
(b)



(c)



(d)

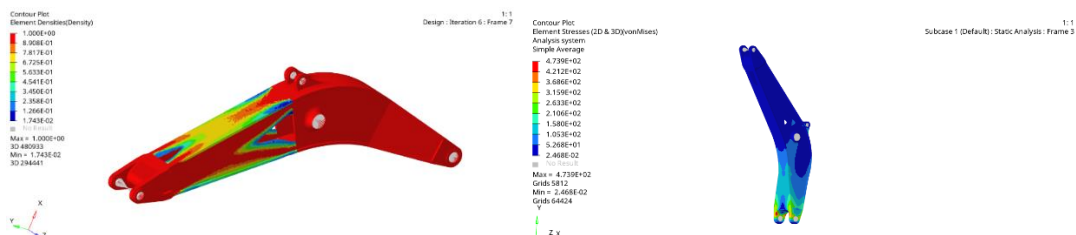


(e)

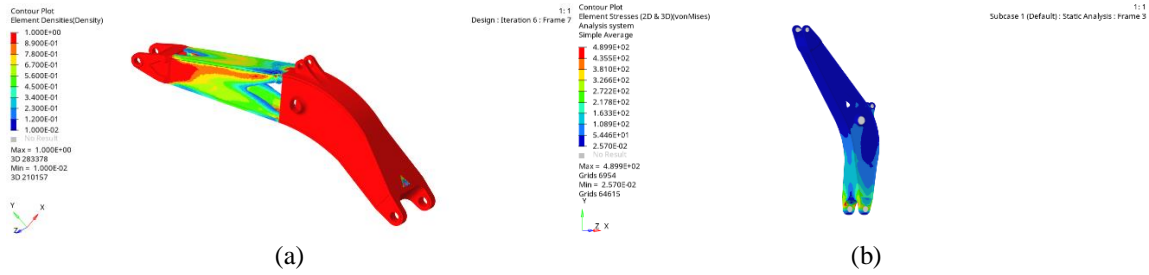
Gambar 6. Hasil Tegangan VonMises Pada Setiap Variasi Jumlah elemen (a) 65533 elemen, (b) 79725, (c) 102135, (d) 133722, dan (e) 367762.

3.3 Hasil Optimasi Topologi

Hasil optimasi diilustrasikan pada Gambar 7 dengan elemen $\rho > 0,7$ dimana material dihilangkan dari bagian yang tidak terlalu dipengaruhi oleh gaya yang diberikan sehingga diperoleh *boom excavator* yang lebih ringan dengan tegangan yang tidak berbeda jauh..

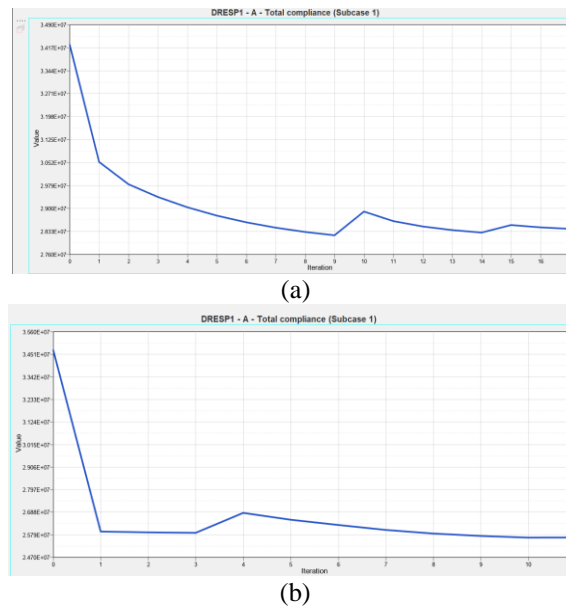


Gambar 7. Hasil optimasi topologi desain variabel.1



Gambar 8. Hasil optimasi topologi (a) desain variabel.1 (b) desain variabel 2

Hasil optimasi diatas dapat diketahui secara komputasional melalui grafik *weight compliance* pada hasil optimasi desain variabel *boom excavator* yang ditunjukkan Gambar 9.



Gambar 9. Grafik nilai *compliance* (a) desain variabel 1 (b) desain variabel 2

3.4 Pembahasan Hasil Optimasi Topologi

Optimasi topologi merupakan salah satu bentuk optimasi yang sering diterapkan pada suatu struktur. Pengaplikasian optimasi topologi pada penelitian ini bertujuan untuk merubah desain *boom excavator* menjadi desain yang lebih ringan. Pendekatan yang dipakai menggunakan metode distribusi *elemen density* atau *SIMP method* yang merubah struktur *boom excavator* yang kontinum menjadi struktur diskrit berupa elemen-elemen [11]. Dengan metode tersebut dapat menghasilkan desain *boom excavator* yang lebih ringan dan optimal. Hal tersebut ditunjukkan dengan perbandingan hasil optimasi desain antara desain awal dan desain setelah optimasi pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Perbandingan desain awal dan sesudah optimasi.

Pembanding	Desain Awal	Desain Optimasi	
		Desain Variabeel 1	Desain Variabeel 2
Massa (kg)	6730	6537	6516
Tegangan maksimum (MPa)	470.5	473.9	478.7
<i>Safety factor</i>	2.12	2.11	2.08

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi linear statik menggunakan metode elemen hingga didapatkan nilai tegangan maksimum von mises sebesar 470.5 MPa pada konfigurasi posisi jangkauan ketinggian maksimum. Dari hasil optimasi topologi didapatkan kenaikan tegangan maksimum vonMises pada desain variabel 1 menjadi 473.9 MPa dan desain variabel 1 menjadi 478.7 MPa. Nilai *safety factor* dari desain variabel 1 bernilai 2.11 sedangkan *safety factor* dari desain variabel 2 2.08 dimana bisa dikatakan nilai dari tegangan yang terjadi pada kedua desain walaupun cenderung naik tetapi masih dinyatakan aman. Jika dibandingkan antara desain awal dan hasil optimasi bahwa yang paling optimal dari segi material adalah desain hasil optimasi yang berkurang dari desain awal yaitu 6730 kg menjadi 6516 kg.

5. Daftar Pustaka

- [1] Janmit Raj., dkk. 2015 " Study on the Analysis of Excavator Boom: A Review"., SSRG International Journal of Mechanical Engineering., ISSN: 2348 – 8360
- [2] Fernandez J.E., Vijande R., Tucho R., Rodriguez J., Martin A., "Materials selection to excavator tooth in mining industry" *Elsevier, Wear*, pp. 11–18, 2001.
- [3] Bhaveshkumar P.Patel., dkk., 2013., " Structural Optimization Of Mini Hydraulic Backhoe Excavator Attachment Using Fea Approach"., 9
- [4] SSSAB., "Hardox 400 sheet", Data sheet 2061uk Hardox 400 Sheet 2016-03-02
- [5] Patel, B.P. & Prajapati, J.M. 2012. "Evaluation Of Bucket Capacity, Digging Force Calculations And Static Force Analysis Of Mini Hydraulic Backhoe Excavator". *Machine Design*. 4(1). 59-66. ISSN 1821-1259.
- [6] Caterpillar 374 DL., (2013) Hydraulic Excavator specifications.
- [7] SAE J1179 : Hydraulic Excavator and Backhoe Digging Force. *Warrendale : SAE International*, 1990.
- [8] Altair HyperWorks Help. [Referred 10.4.2013].
- [9] Chunlei Yu., dkk., 2020., "Finite element analysis of excavator mechanical behavior and boom structure optimization"., 173 (2021) 108637.
- [10] Jeff Gardiner., "Finite Element Analysis Convergence and Mesh Independence"., Selley, et all, *Engineering Optimization*. Budapest, 2012.
- [11] Niteens. Patil., dkk., "FEA Analysis and Optimization of Boom of Excavator"., *International Conference on Ideas, Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, ISSN: 2321-8169, Volume: 5 Issue: 6