

ANALISIS SIFAT MEKANIK DAN OPTIMALISASI STRUKTUR *BOOM EXCAVATOR V EC650BE* MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Ariq Fathurrahman*, Sumar Hadi Suryo^{a,**}, Muchammad^a

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

*E-mail: ariqfathurrahman@students.undip.ac.id; **E-mail: sumarhs.undip@gmail.com

Abstrak

Alat berat memiliki peranan penting dalam membantu keterbatasan manusia dalam melakukan pekerjaan. *Excavator* merupakan alat berat yang menggunakan sistem hidrolik sebagai penggerak utama dimana sistem ini menggerakkan berbagai komponen utama seperti *bucket*, *arm*, dan *boom* sehingga *excavator* dapat melakukan pekerjaan. Penelitian ini membahas tentang perancangan desain optimasi *boom excavator V EC650BE* dimana proses optimasi topologi dilakukan dengan 3 variasi material yaitu HARDOX 400, S690QL dan SAILMA 450 HI. Metode yang dipilih dalam penelitian ini adalah analisis linear statik menggunakan metode elemen hingga. Diketahui bahwa pada desain awal *excavator* tegangan *VonMises* terbesar pada setiap variasi material berturut-turut adalah 372,3 MPa, 370,5 MPa, dan 370,4 MPa. Hasil yang didapatkan dari proses optimasi yaitu tegangan maksimum *VonMises* pada desain variasi pertama sebesar 370,6 MPa dengan pengurangan massa 243 kg dan pada variasi kedua tegangan maksimum sebesar 374,4 MPa dengan pengurangan massa 289 kg.

Kata kunci: boom excavator; metode elemen hingga; optimasi topologi; tegangan vonmises

Abstract

Heavy equipment has an important role in helping human limitations to carry out task. Excavators are a kind of heavy equipment that uses a hydraulic system as the main power supply where this system moves various main components such as buckets, arms, and booms so that the excavator can do the job. This research discusses the optimization design of the excavator boom of V EC650BE where topology optimization process is carried out utilizing 3 variations of material, namely HARDOX 400, S690QL, and SAILMA 450HI. The method chosen in this research is linear static analysis using Finite Element Method. Initial design of the excavator boom show that the largest VonMises stresses for each material variations were 372.3 MPa, 370.5 MPa, and 370.4 MPa, respectively. The results obtained from optimization process are the maximum VonMises stress in the first design variation is 370.6 MPa including a mass reduction of 243 kg and in the second design variation the maximum stress is 374.4 MPa with a mass reduction of 289 kg.

Keywords: boom excavator; finite element method; topology optimization; vonmises stress

1. Pendahuluan

Excavator merupakan salah satu jenis alat berat yang umum digunakan dalam dunia konstruksi. Peralatan ini dapat digunakan untuk berbagai pekerjaan seperti pembukaan lahan, penggalian dan penimbunan tanah, serta pemindahan material [1]. *Excavator* merupakan alat berat yang menggunakan sistem hidrolik sebagai penggerak utama, dimana sebuah mesin pembakaran dalam digunakan untuk mengoperasikan sebuah pompa hidrolik. Excavator terdiri dari beberapa bagian, yaitu lengan (*arm*), tongkat (*boom*), *bucket*, kabin, dan *undercarriage*. Sistem hidrolik pada excavator memiliki 6 aktuator yang menggerakkan setiap bagian seperti motor *swing*, *boom cylinder*, *arm cylinder*, *bucket cylinder*, serta *travel motor* pada masing-masing track [2]. *Boom excavator* merupakan salah satu komponen penting dalam sebuah *excavator*, dimana kinerja *boom* dalam pekerjaan penggalian menentukan kinerja keseluruhan dari sebuah *excavator*, baik itu dari sisi performa, keandalan, serta keamanan dalam pekerjaan penggalian [3]. Oleh karena itu, penelitian ini akan membahas tentang perancangan desain optimasi topologi *boom excavator* serta melakukan analisa gaya reaksi saat excavator melakukan pekerjaan penggalian untuk membahas salah satu permasalahan yang ada pada *boom excavator* sehingga dapat dilakukan manufaktur desain *boom* yang lebih ringan tanpa mengurangi kekuatan.

Dalam penelitian ini, perancangan desain dilakukan dengan pendekatan dari desain asli dengan menggunakan variasi posisi jangkauan ketinggian maksimum dan tiga variasi material, yaitu HARDOX 400, S690QL, dan SAILMA 450HI. Penelitian dilakukan menggunakan analisis linear statik dengan metode elemen hingga pada *software Altair Hyperworks*, dimana sifat mekanik material yang dipakai didapatkan dari penelitian sebelumnya oleh Bhaveshkumar mengenai

penggunaan material Hardox 400 pada desain *boom* [4] serta *catalog* produk dari produsen material yang akan digunakan dalam variasi.

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Identifikasi Material

Pada penelitian ini, material yang akan digunakan sebagai variasi analisis adalah baja tipe HARDOX 400, S690QL, dan SAILMA 450HI. Material ini dipilih berdasarkan studi yang telah dilakukan sebelumnya, standar produksi, serta penggunaan umum material dalam berbagai industri. Berdasarkan *catalog* produk, karakteristik setiap material tersebut dapat dilihat pada Tabel sebagai berikut.

Tabel 1. Data Karakteristik material Hardox 400 [5].

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

Tabel 2. Data Karakteristik material S690QL [6].

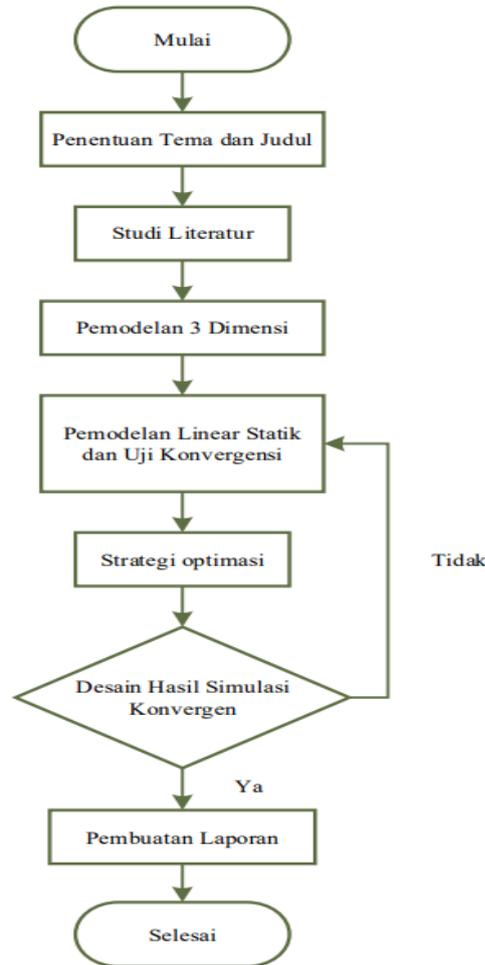
No.	Data karakteristik S690QL	Nilai
1	Modulus Elastisitas (E)	206000 Pa
2	<i>Poisson Ratio</i>	0.30
3	Massa Jenis	7910 kg/m ³
4	<i>Yield Strength</i>	690 Mpa

Tabel 3. Data Karakteristik material SAILMA 450HI [7].

No.	Data karakteristik SAILMA 450HI	Nilai
1	Modulus Elastisitas (E)	210000 Pa
2	<i>Poisson Ratio</i>	0.30
3	Massa Jenis	7900 kg/m ³
4	<i>Yield Strength</i>	450 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

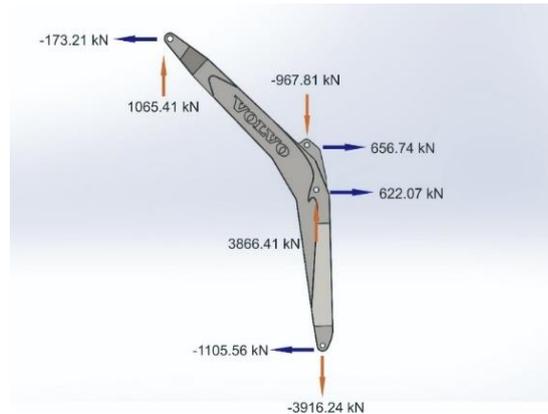
Penelitian ini menggunakan desain *boom excavator* V EC650BE. Pembuatan desain *boom excavator* dilakukan menggunakan *software* CAD dengan menggunakan pendekatan dari desain aslinya. Pada Gambar 2 diperoleh hasil desain 3D *boom excavator* yang dibuat menggunakan *software* Solidworks 2018.



Gambar 2. Hasil Desain CAD Boom Excavator.

2.4 Pemodelan linear statik

Excavator yang digunakan pada penelitian ini adalah V EC650BE yang memiliki *bucket digging force* sebesar 335000 N [8]. Permodelan linear statik dipengaruhi oleh gaya yang bekerja pada *bucket* dan *arm excavator*. Pada penelitian ini gaya diperoleh dari *bucket digging force* (F_b) yang terdapat pada *catalog* produk *excavator*. Menggunakan perhitungan dari *bucket*, *arm*, dan *boom* dapat diperoleh gaya reaksi dan arahnya sesuai dengan beban yang diberikan. Hasil perhitungan gaya reaksi pada boom excavator dapat dilihat pada gambar 3 [9].



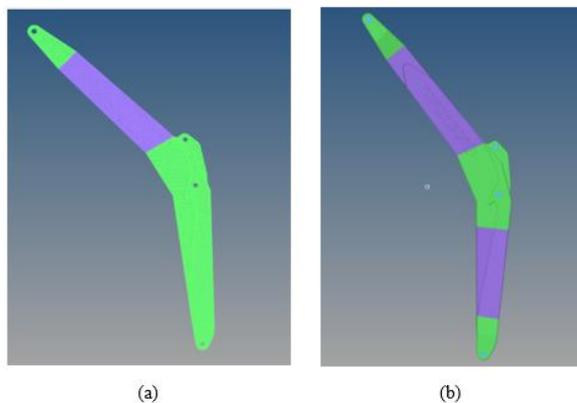
Gambar 3. Gaya Reaksi dan Arah Gaya pada *Boom Excavator*

2.5 Proses Optimasi

Metode optimasi yang digunakan merupakan optimasi topologi menggunakan *software Altair Optistruct* [10]. Pada desain *boom*, dilakukan optimasi topologi dikarenakan bentuknya merupakan struktur 3D *continuum* dan strategi optimasi ini dapat menghasilkan desain dengan pengurangan massa yang signifikan. 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 ungu pada gambar menunjukkan *design variable* sedangkan warna hijau menunjukkan bagian *non-design variables* atau daerah yang tidak bisa diubah.



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* yang digunakan berupa *volume fraction* sebesar 70%.

3) Menentukan Respon Struktur

Respon merupakan perhitungan performa sistem yang dapat ditentukan sesuai dengan *constraint* dan *objective* dari analisis yang dilakukan. Pada proses optimasi ini, respon struktur yang digunakan adalah *weight compliance* dan *volume fraction*.

4) Menentukan *Objective*

Objective merupakan tujuan setiap fungsi respon yang akan dioptimalkan, hasil dari penentuan *objective* adalah variabel dari desain yang telah dipilih. Pada optimasi ini objektifnya berupa *minimize weight compliance*.

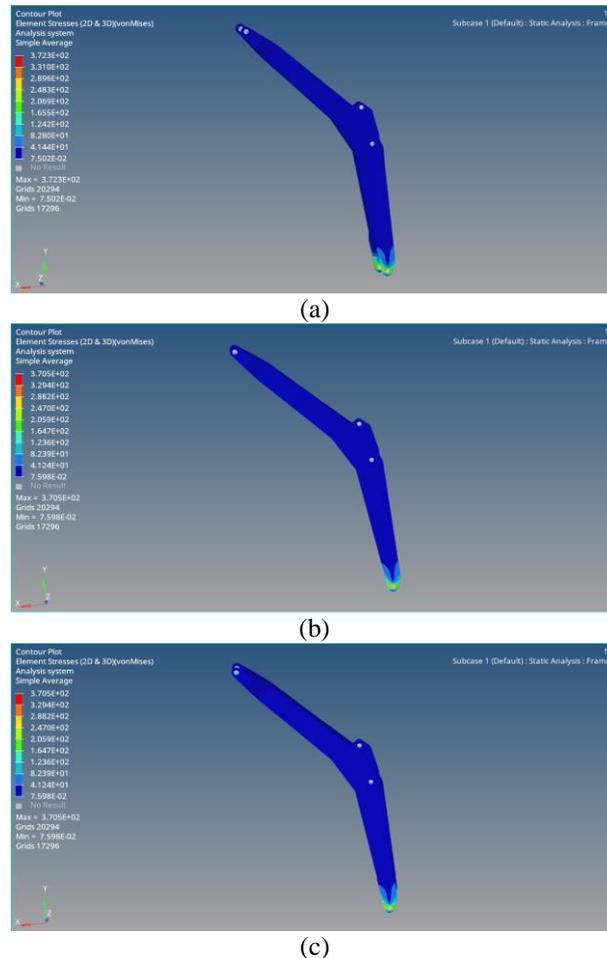
5) Menentukan *Manufacturing Constraint*

Dalam optimasi topologi, masalah yang kerap ditemui adalah konsep desain yang dikembangkan seringkali tidak dapat diproduksi. Untuk mengatasi hal ini, *Optistruct* menawarkan sejumlah metode berbeda untuk memperhitungkan kemampuan manufaktur ketika melakukan optimasi topologi. Oleh karena itu *manufacturing constraint* harus ditentukan agar hasil optimasi dapat diproduksi, 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

Analisis linear statik dilakukan untuk mengetahui apakah material yang digunakan tidak mengalami kegagalan dan dapat dioptimasi dengan cara mendapatkan nilai vonMises dari suatu desain dengan material yang didapatkan dari hasil identifikasi sehingga besaran tegangan dan kekuatan material terhadap tegangan tersebut dapat diketahui [11]. Hasil tegangan VonMises dari tiga variasi material *boom* menggunakan software *Altair Hyperworks 2019* dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Nilai Tegangan *VonMises* pada *boom excavator V EC650BE* (a) material HARDOX 400, (b) material S690QL, dan (c) material SAILMA 450HI.

Berdasarkan tiga variasi material yang digunakan, diketahui bahwa hasil tegangan *VonMises* terbesar pada setiap variasi material adalah (a) 372,3 MPa, (b) 370,5 MPa, dan (c) 370,4 MPa.

3.2 Hasil Uji Konvergensi

Uji konvergensi dilakukan untuk menentukan jumlah elemen yang sesuai untuk dilanjutkan dengan proses optimasi [12]. Hasil dari uji konvergensi pada setiap variasi material dapat dilihat pada tabel dibawah ini, dimana didapat hasil yang konvergen pada setiap kenaikan elemen dengan melakukan perbaikan *mesh* secara bertahap dan pada daerah tertentu.

Tabel 4. Hasil Uji Konvergensi Material HARDOX 400.

No	Tegangan Maksimum (MPa)	Jumlah Elemen
1	334.8	70003
2	348.1	94826
3	355.8	131795
4	369.4	181498
5	372.3	270721

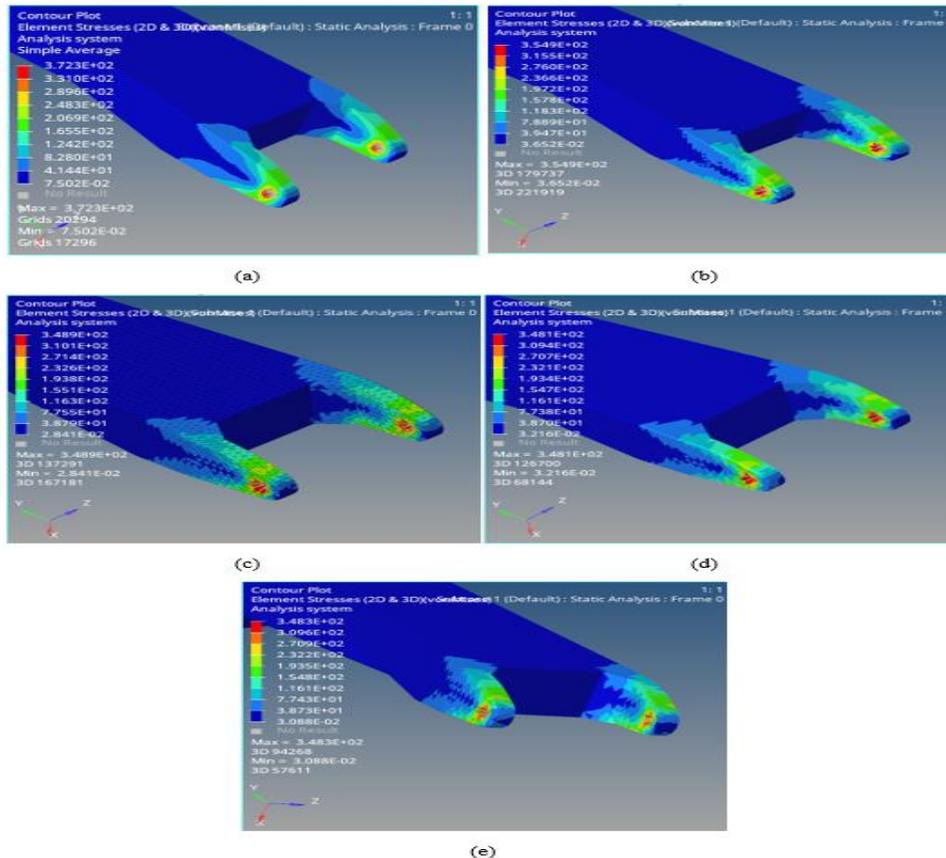
Tabel 5. Hasil Uji Konvergensi Material S690QL.

No	Tegangan Maksimum (MPa)	Jumlah Elemen
1	333.7	70003
2	346.7	94826
3	354.5	131795
4	368.1	181498
5	370.5	270721

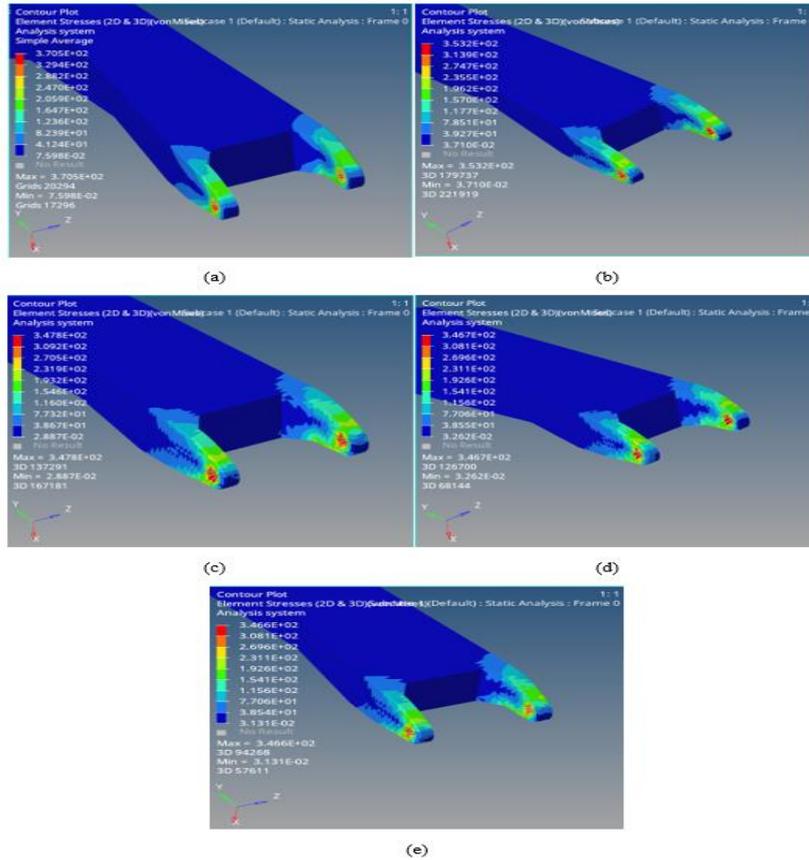
Tabel 6. Hasil Uji Konvergensi Material SAILMA 450HI.

No	Tegangan Maksimum (MPa)	Jumlah Elemen
1	333.3	70003
2	346.5	94826
3	354.7	131795
4	368.1	181498
5	370.4	270721

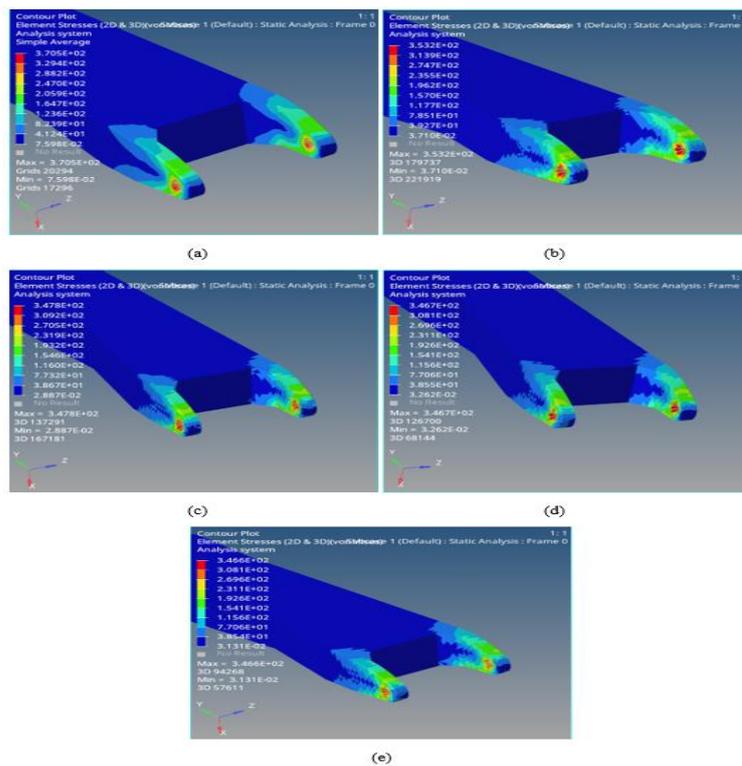
Berdasarkan variasi kenaikan elemen pada Tabel diatas, dapat dilihat bahwa semakin banyak jumlah elemen, nilai tegangan *VonMises* meningkat namun tidak mengalami perubahan yang signifikan. Hal ini menandakan nilai tegangan *VonMises* sudah konvergen. Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan elemen paling banyak pada hasil uji konvergensi ke-5, yaitu 270721. Berikut ini adalah gambar distribusi tegangan yang terjadi pada *boom excavator* dengan setiap variasi material.



Gambar 6. Nilai Tegangan Material HARDOX 400 Variasi Jumlah Elemen (a) 70003, (b) 94826, (c) 131795, (d) 181498, dan (e) 270721.



Gambar 7. Nilai Tegangan Material S690QL Variasi Jumlah Elemen (a) 70003, (b) 94826, (c) 131795, (d) 181498, dan (e) 270721.



Gambar 8. Nilai Tegangan Material SAILMA 450HI Variasi Jumlah Elemen (a) 70003, (b) 94826, (c) 131795, (d) 181498, dan (e) 270721.

3.3 Analisis Safety Factor pada Boom

Safety factor merupakan sebuah indikator untuk menentukan kekuatan dan keamanan penggunaan pada sebuah desain atau struktur komponen apabila diberikan pembebanan. Nilai *safety factor* dapat dikatakan aman apabila nilai tegangan maksimum *VonMises* tidak melebihi batas nilai kekuatan pada material yang digunakan, dalam hal ini merupakan *yield strength* dari material tersebut. Perhitungan *safety factor* dapat dilakukan dengan rumus sebagai berikut.

$$Safety\ Factor = \frac{Yield\ Strength}{VonMises\ stress}$$

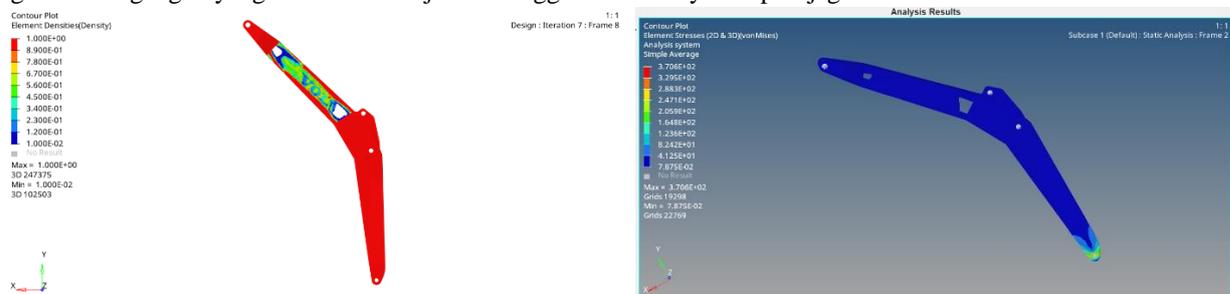
Tabel 7. Hasil Perhitungan *Safety Factor*.

No.	Jenis Material	VonMises (MPa)	Yield Strength (MPa)	Safety Factor	Keterangan
1	HARDOX 400	372,3	1000	2,68	Safe
2	S690QL	370,5	690	1,86	Safe
3	SAILMA 450HI	370,4	450	1,21	Safe

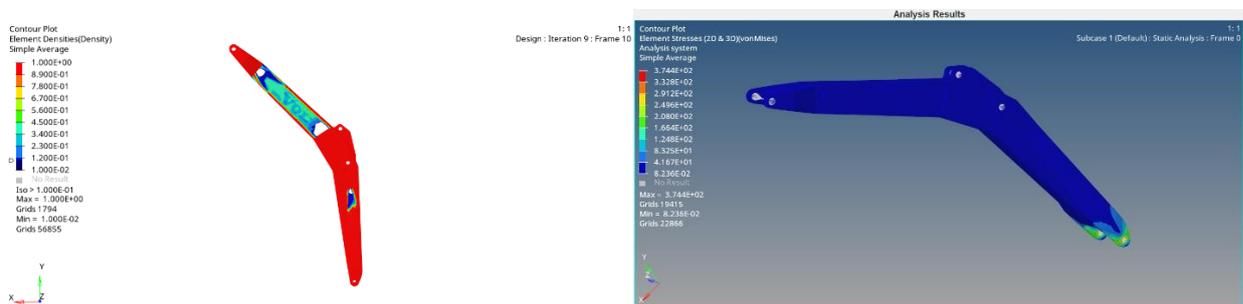
Berdasarkan tabel diatas, dapat disimpulkan bahwa semua variasi material dinyatakan aman untuk digunakan. Namun, nilai *safety factor* terbesar didapatkan pada jenis material HARDOX 400 sehingga material ini dipilih sebagai desain yang akan dilanjutkan ke tahap optimasi topologi pada penelitian ini.

3.4 Hasil Optimasi Topologi

Hasil optimasi topologi diilustrasikan pada Gambar 9 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 nilai tegangan yang tidak berbeda jauh sehingga kekuatannya tetap terjaga.

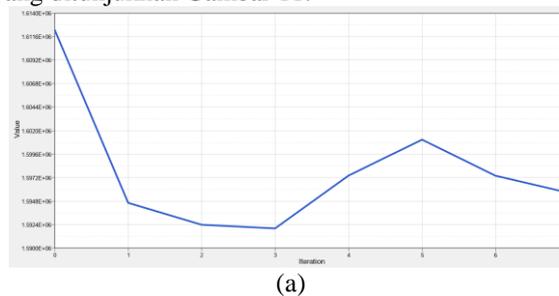


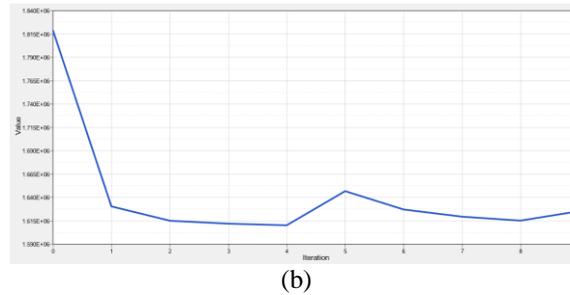
Gambar 9. Hasil optimasi topologi desain variabel 1



Gambar 10. Hasil optimasi topologi desain variabel 2

Hasil optimasi diatas dapat diketahui secara komputasional melalui grafik *weight compliance* pada hasil optimasi desain variabel *boom excavator* yang ditunjukkan Gambar 11.





Gambar 11. Grafik nilai *compliance* (a) desain variabel 1 (b) desain variabel 2

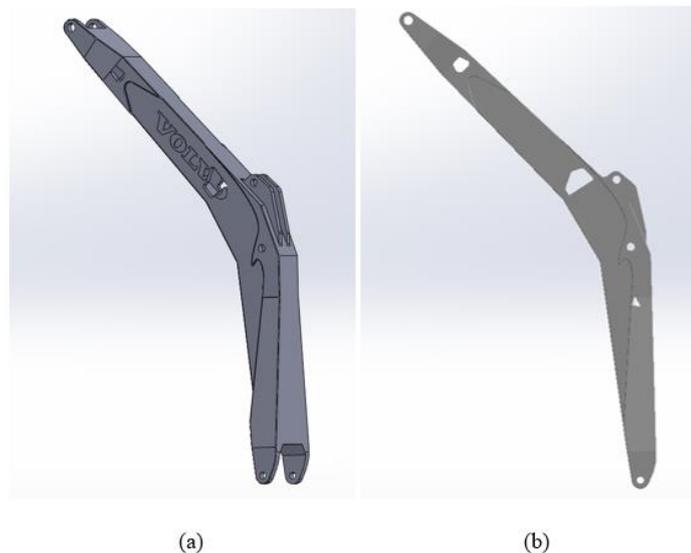
3.5 Pembahasan Hasil Optimasi Topologi

Penggunaan optimasi topologi pada penelitian ini bertujuan untuk merubah desain *boom excavator* menjadi desain yang lebih ringan tanpa mengurangi kekuatan desain tersebut. Pendekatan yang dipakai menggunakan metode distribusi *elemen density* atau *SIMP method* yang merubah struktur *boom excavator* yang kontinu menjadi struktur diskrit berupa elemen-elemen [13]. Metode tersebut dapat menghasilkan desain *boom excavator* yang lebih ringan dan optimal, perbandingan hasil antara desain awal dan desain setelah optimasi pada *boom excavator* V EC650BE dapat dilihat pada Tabel 8 berikut ini.

Tabel 8. Perbandingan desain awal dan desain hasil optimasi.

Indikator	Desain Awal	Hasil Optimasi Topologi	
		Desain Variabel 1	Desain Variabel 2
Massa (kg)	4870	4627	4581
Tegangan maksimum (MPa)	372.3	370.6	374.4
<i>Safety factor</i>	2.68	2.69	2.67

Desain akhir didapat dari proses *smoothing* dari hasil simulasi optimasi dengan mengubah bentuk *finite element* menjadi *surface* dengan fitur *OSSmooth* yang nantinya diubah menjadi format CAD (Parasolid, IGES, STEP).



Gambar 12. Desain Hasil Optimasi (a) Variabel 1, dan (b) Variabel 2.

4. Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi *linear static* menggunakan metode elemen hingga, didapatkan nilai tegangan maksimum *VonMises* pada jenis material HARDOX 400, S690QL, dan SAILMA 450HI berturut-turut adalah 372,3 MPa, 370,5 Mpa, dan 370,4 MPa. Sedangkan nilai *safety factor* pada jenis material HARDOX 400, S690QL, dan SAILMA 450HI berturut-turut adalah 2,68, 1,86, dan 1,21. Berdasarkan hasil optimasi topologi pada desain *boom* dengan jenis material HARDOX 400, didapatkan nilai tegangan maksimum *VonMises* adalah 370,6 MPa pada desain variabel pertama dan 374,4 MPa pada desain variabel kedua, dengan nilai *safety factor* untuk desain variabel pertama sebesar 2,69 dan pada desain variabel kedua sebesar 2,67. Selain itu, hasil optimasi topologi juga menunjukkan adanya penurunan massa pada desain *boom*

excavator dimana penurunan pada desain variabel pertama adalah sebesar 243 kg dan pada desain variabel kedua sebesar 289 kg.

5. Daftar Pustaka

- [1] Zarkasyi, A., Sariyusda, Jufriadi & Hamdani, 2019. Analisa Kerusakan Silinder Hidrolik pada Excavator Hitachi EX 200 LC dengan Metode Fishbone di PT. Alhas Jaya Group. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 31-34.
- [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] Raj, Janmit., dkk. 2015." Study on the Analysis of Excavator Boom: A Review"., SSRG International Journal of Mechanical Engineering., ISSN: 2348 – 8360
- [4] Bhaveshkumar P.Patel., dkk., 2013.,” Structural Optimization Of Mini Hydraulic Backhoe Excavator Attachment Using Fea Approach”., 9
- [5] SSAB., 2016. ”Hardox 400 sheet”., Data sheet 2061uk Hardox 400 Sheet.
- [6] Marc Steel., 2016. “S690QL Steel Plate Specification”
- [7] SAIL., 2020. “Plates Product Brochure”
- [8] Volvo Construction Equipment, 2008. *Volvo Excavator EC650*. USA: s.n.
- [9] SAE J1179: Hydraulic Excavator and Backhoe Digging Force. *Warrendale: SAE International*, 1990.
- [10] Altair HyperWorks Help. [Referred 10.4.2013].
- [11] Yu, C., dkk., 2021., “Finite element analysis of excavator mechanical behavior and boom structure optimization”., *Measurement* 173. 1-9. 108637.
- [12] Jeff Gardiner., “Finite Element Analysis Convergence and Mesh Independence”., Selley, et all, *Engineering Optimization*. Budapest, 2012.
- [13] 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