

## Optimasi Desain Topologi Struktur Arm Excavator Cat 374d L Menggunakan Metode Elemen Hingga

Sumar Hadi Suryo\*, Harto\*\*, Bambang Yunianto

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

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

### Abstract

*In the current era of development, infrastructure is the driving wheel of economic growth. Company manufacturer of construction which is headquartered in Illinois, United States of America, namely Caterpillar Inc. is a large manufacturer of construction equipment that operates more than 157 countries. Excavators are heavy equipment and are usually used for excavation. During the operation of extracting the unknown forces resistive offered by the terrain to the bucket teeth. None of the teeth required of their bucket and weight of teeth in manufactures of excavators. And also production of teeth do not need of wear compensation of design procedure, they only follow their previous experience results. In this study discusses the design optimization of the arm to produce a design that is lightweight but still retains his strength, arm is R4.67m CAT 374D L. Process optimization on the arm of the excavator to apply the concept of optimization the topology. The method includes the determination of the type of material Hardox400. The analysis was then performed linear static using the finite element method to see the maximum voltage that occurs on the arm, the value of the stress von Mises amounted to 350.9 MPa. Further optimization of the topology by selecting some of the variations in area design which produces a reduction of mass of 4000 kg became 3852 kg. The reduction of mass causes a change in maksimum voltage von Mises that occurs on the to be 340.5 MPa and a safety factor of design optimization to achieve 2.88 is still in a safe condition.*

**Keywords:** Arm Excavator; Finite Element Method; Topology Optimization.

### Abstrak

Pada era pembangunan saat ini, infrastruktur merupakan roda penggerak pertumbuhan ekonomi. Perusahaan produsen konstruksi yang bermarkas di Illinois, Amerika Serikat, yaitu Caterpillar Inc. adalah produsen besar alat konstruksi yang beroperasi lebih dari 157 negara. Excavator adalah alat berat dan biasanya digunakan untuk penggalian. Selama operasi penggalian tidak diketahui pasukan resistive ditawarkan oleh medan ke bucket teeth. Manufaktur dari excavator hanya mempertimbangkan tidak adanya gigi yang dibutuhkan untuk bucket dan berat dari gigi. Dan juga produksi teeth tidak memerlukan kompensasi desain, rata2 hanya menggunakan hasil dari pengalaman yang sudah dilakukan. Pada penelitian ini membahas tentang perancangan optimasi arm agar menghasilkan desain yang lebih ringan tetapi tetap mempertahankan kekuatannya, arm tersebut adalah R4.67m CAT 374D L. Proses optimasi pada arm excavator menerapkan konsep optimasi topologi. Metode yang dilakukan meliputi penentuan jenis material Hardox400. Kemudian dilakukan analisis linear statik menggunakan metode elemen hingga untuk melihat tegangan maksimum yang terjadi pada arm, besarnya nilai tegangan von Mises sebesar 350.9 MPa. Selanjutnya dilakukan optimasi topologi dengan memilih beberapa variasi area desain yang menghasilkan reduksi massa dari 4000 kg menjadi 3852 kg dan. Reduksi massa tersebut menyebabkan perubahan tegangan maksimum von Mises yang terjadi pada arm menjadi 340.5 MPa dan safety factor desain optimasi mencapai 2.88 masih dalam kondisi aman.

**Kata kunci:** Arm Excavator; Metode Elemen Hingga; Optimasi Topologi.

### 1. Pendahuluan

Salah satu bagian *excavator* yang akan diteliti pada paper ini adalah *arm*. Untuk menentukan kekuatan 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. Manufaktur dari excavator hanya mempertimbangkan tidak adanya gigi yang dibutuhkan untuk bucket dan

berat dari gigi. Dan juga produksi teeth tidak memerlukan kompensasi desain, rata2 hanya menggunakan hasil dari pengalaman yang sudah dilakukan. [1]. *Excavator* bekerja di bawah proses yang sangat kompleks dengan periode bongkar muat, dan akibatnya baja untuk membuat komponen ini harus dipilih menerapkan kriteria yang seimbang antara ketangguhan dengan relatif baik dan kekerasan cukup untuk menahan faktor abrasive. [2]. *Bucket teeth* adalah salah satu komponen penting dari excavator. *Bucket teeth* berfungsi sebagai penggali material. Mereka dibagi menjadi tiga sub-komponen: *bucket* yang berfungsi sebagai wadah kontainer, fungsi adaptor sebagai alat penghubung antara *bucket* dan *teeth*, dan *teeth* berfungsi sebagai penggali bahan. [3]. Maka dari itu penulis melakukan optimasi desain pada *arm excavator* untuk membahas salah satu permasalahan yang ada pada *arm* 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 *arm excavator* yang dia analisis adalah Hardox 400 [1]. Dalam simulasi ini digunakan metode linear statik untuk proses optimasi.

Optimasi yang dilakukan adalah optimasi topologi. Tujuan utama dari proses optimasi topologi ini adalah untuk mengurangi volume dari *design variable* yang telah ditentukan dengan cara memaksimalkan nilai kekakuan dari struktur yang diizinkan [4-5]. Fungsi objektif dari optimasi topologi merupakan nilai fungsi linear dari *equilibrium displacement field*, fungsi linear ini disebut *compliance* yang merupakan *inverse* dari nilai kekakuan sehingga ketika nilai *compliance* minimum didapatkan nilai kekakuan maksimum [6].

## 2. Material dan Metode Penelitian

### 2.1 Identifikasi Material

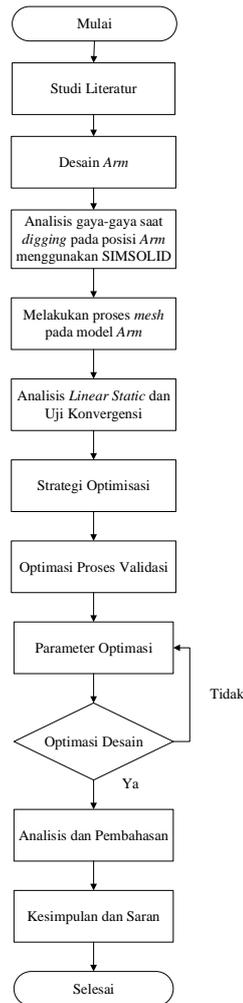
Pada penelitian ini, penentuan material *arm excavator* yang digunakan merujuk pada penilitian Muhammad Arief yang membahas tentang karakterisasi material pada *arm* yaitu Hardox 400 [3]. Data-data yang diperoleh dari penelitian tersebut diperlukan dalam proses optimasi desain *arm* kali ini. Data tersebut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

**Tabel 1.** Data Karakteristik material Hardox 400 [3].

No.	Data karakteristik Hardox 400	Nilai
1	Modulus Elastisitas (E)	210 GPa
2	<i>Poisson Ratio</i>	0.29
3	Massa Jenis	7473.57
4	<i>Yield Strength</i>	1000 MPa

### 2.2 Diagram Alir

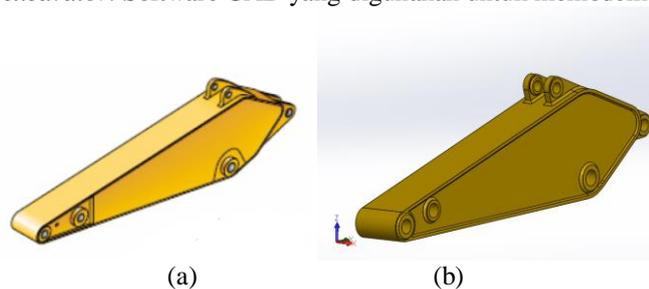
Pada penelitian ini terdapat langkah-langkah simulasi linear statik dan optimasi *arm excavator* yang mengacu pada diagram alir Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir

### 2.3 Proses Permodelan 3D Arm Excavator

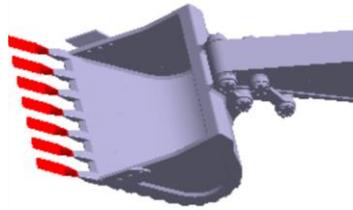
Arm excavator yang dipakai dalam penelitian ini adalah arm CAT 374D L seperti pada Gambar 2 (a). Pembuatan desain arm menggunakan software CAD dengan menggunakan pendekatan dari desain aslinya. Pada Gambar 2 (b) diperoleh hasil desain 3D arm excavator. Software CAD yang digunakan untuk memodelkan adalah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



Gambar 2 Desain arm 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 (Fb) [7] pada excavator CAT 374D L sebesar 297500 N. Diketahui bahwa jumlah bucket teeth pada bucket sebanyak 5 unit, sehingga gaya Fb tersebut dibagi ke 5 unit yang menghasilkan gaya 59500 N pada setiap bucket tooth. Untuk kondisi maksimum, gaya terjadi pada sudut 32 derajat terhadap arm.



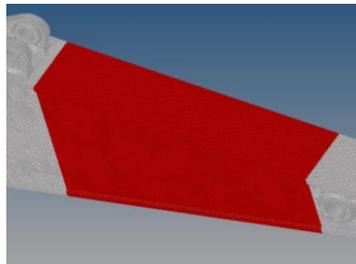
Gambar 3. Bucket digging force pada permodelan linear statik

## 2.5 Proses Optimasi

Metode optimasi yang digunakan merupakan optimasi topologi menggunakan perangkat lunak altair *optistruct* [5]. Pada desain *arm 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. Design variable arm excavator

### 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*.

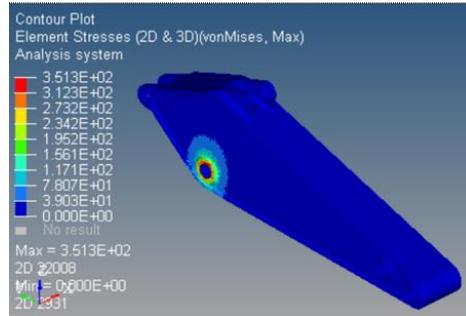
### 5) Menentukan *Manufacturing Constraint*

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 [5]. 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 0,15 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 von Mises dari suatu desain dengan material yang didapatkan dari hasil identifikasi [8]. Hasil analisa linear statik dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan hasil simulasi linear statik nilai von Mises yang dihasilkan sebesar 351.3 MPa.



Gambar 5. Nilai von Mises *arm excavator* CAT 374D L

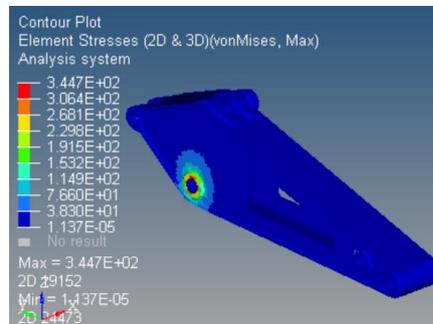
### 3.2 Hasil Uji Kovergensi

Untuk menentukan jumlah elemen yang sesuai untuk dilanjutkan dengan proses optimasi dilakukan uji konvergensi terlebih dahulu [9] 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.

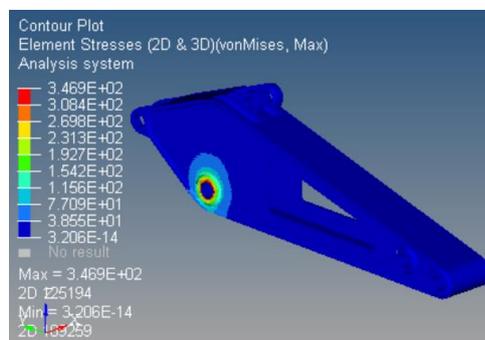
Tabel 2. Nilai tegangan maksimum von Mises tiap elemen

No	Tegangan Maksimum (MPa)	Jumlah Elemen
1	344.7	13057
2	346.9	19466
3	339.8	33157
4	336.9	72217
5	334.2	278846

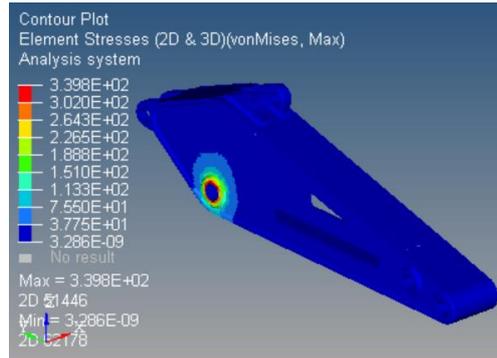
Berdasarkan variasi kenaikan elemen pada Tabel 2 diatas, semakin elemen bertambah maka tegangan yang terjadi menurun, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada elemen-elemen tersebut menunjukkan sudah konvergen. Pada penelitian ini menggunakan elemen paling banyak pada hasil uji konvergensi ke-5, yaitu 278846. Berikut ini adalah gambar distribusi tegangan yang terjadi pada *arm excavator*.



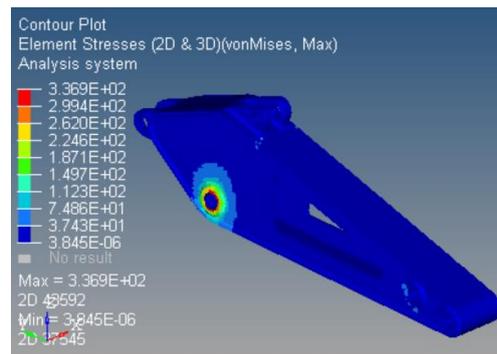
Gambar 6. Nilai von Mises uji konvergensi 1



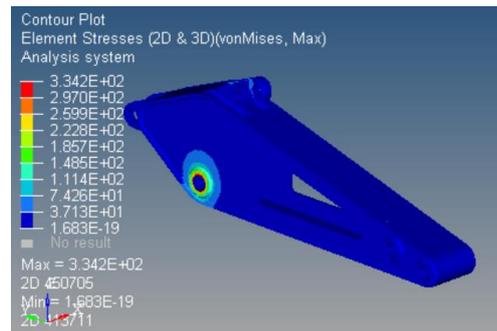
Gambar 7. Nilai von Mises uji konvergensi 2.



Gambar 8. Nilai von Mises uji konvergensi 3.



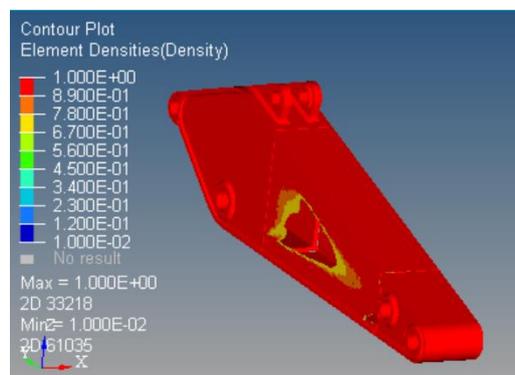
Gambar 9. Nilai von Mises uji konvergensi 4.



Gambar 10. Nilai von Mises uji konvergensi 5.

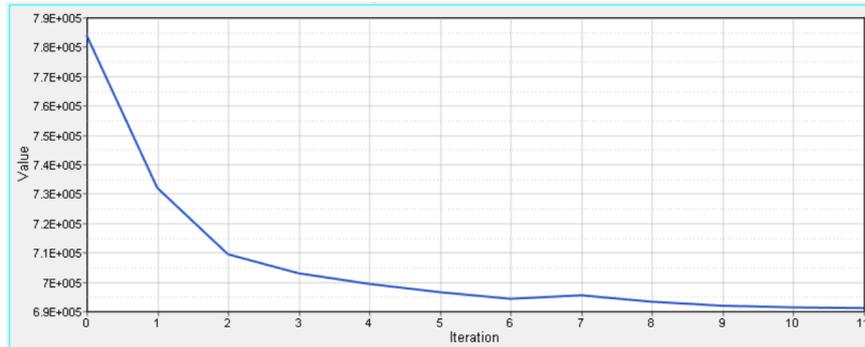
### 3.3 Hasil Optimasi Topologi

Hasil optimasi diilustrasikan pada Gambar 11 dengan elemen  $\rho > 0,5$  dimana material dihilangkan dari bagian yang tidak terlalu dipengaruhi oleh gaya yang diberikan sehingga diperoleh *arm excavator* yang lebih ringan dengan tegangan yang tidak berbeda jauh..



Gambar 11. Hasil optimasi topologi desain variabel.

Hasil optimasi diatas dapat diketahui secara komputasional melalui grafik *weight compliance* pada hasil optimasi desain variabel *arm excavator* yang ditunjukkan Gambar 12.



**Gambar 12.** Grafik nilai *compliance* desain variabel.

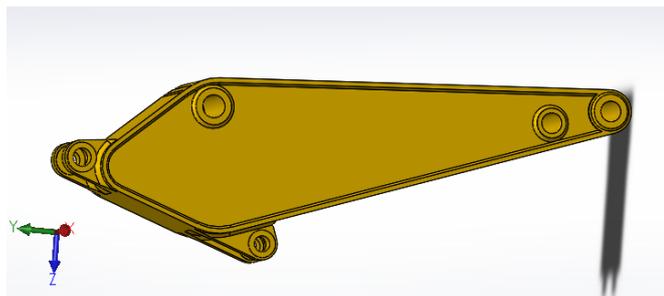
Desain akhir didapat dari proses *smoothing* dari hasil simulasi optimasi dengan mengubah bentuk *finite element* menjadi *surface* dengan fitur *OSSmooth* yang nantinya diubah menjadi format CAD (Parasolid, IGES, STEP). Desain dalam bentuk CAD dapat dilihat pada Gambar 13.

### 3.4 Pembahasan Hasil Optimasi Topologi

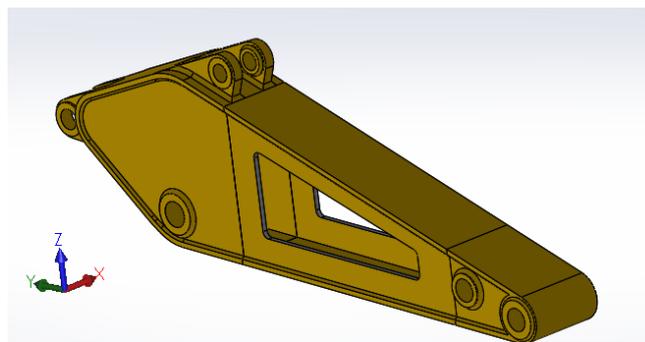
Optimasi topologi merupakan salah satu bentuk optimasi yang sering diterapkan pada suatu struktur. Pengaplikasian optimasi topologi pada penelitian ini bertujuan untuk merubah desain *arm excavator* menjadi desain yang lebih ringan. Pendekatan yang dipakai menggunakan metode distribusi *elemen density* atau *SIMP method* yang merubah struktur *arm excavator* yang kontinum menjadi struktur diskrit berupa elemen-elemen [11]. Dengan metode tersebut dapat menghasilkan desain *arm* yang lebih ringan dan optimal. Hal tersebut ditunjukkan dengan perbandingan hasil optimasi desain antara desain awal dan desain setelah optimasi pada Tabel 3 serta ditunjukkan juga gambar awal desain pada gambar 13 dan hasil optimasi desain pada Gambar 14 berikut.

**Tabel 3.** Perbandingan desain awal dan sesudah optimasi.

Pembanding	Desain Awal	Desain Optimasi
Massa	4000 kg	3852 kg
Tegangan maksimum	351.6 MPa	344.7 MPa
<i>Safety factor</i>	2.84	2.88



**Gambar 13.** Hasil desain *arm*



**Gambar 14.** Desain Hasil Optimasi.

#### 4. Kesimpulan

Setelah dilakukan simulasi linear statik menggunakan metode elemen hingga didapatkan nilai tegangan maksimum von Mises sebesar 350.9 Mpa. Dari hasil optimasi topologi didapatkan penurunan tegangan maksimum von Mises pada desain awal sebesar 350.9 Mpa menjadi 340.5 MPa. Nilai safety factor dari desain awal bernilai 2.84 sedangkan *safety factor* dari desain optimasi 2.88 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 4000 kg menjadi 3852 kg.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. P. Shaikh, "Analysis of Bucket Teeth of Backhoe Excavator Loader and its Weight Optimization" *International Journal of Engineering Research & Technology*, Vol. 4 Issue 05, 2015
- [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] Muhammad Arief R.R, "Analysis of AISI material power of AISI 4140 bucket teeth excavator using influence of abrasive wear", *AIP Conference Proceeding 1977*, 2018.
- [4] Altair HyperWorks Help. [Referred 10.4.2013]. Available: <http://www.altairhyperworks.com/hwhelp/Altair/hw12.0/index.aspx>
- [5] Altair Optimization Guide Book, Practical Aspect of Structure Optimization, 2015.
- [6] Bendsøe, M.P. Sigmund, O, Topology Optimization. Theory, Methods and Applications. Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2003, ISBN 3-540-42992-1.
- [7] SAE J1179 : Hydraulic Excavator and Backhoe Digging Force. Warrendale : SAE International, 1990.
- [8] Dagwar, K. S. Telrandhe, R. G. "Failure Analysis Of Excavator Bucket Tooth." *International Journal of Scientific Research and Engineering Studies*, pp. 2349-8862, vol.5, 2015.
- [9] Oñate, E. "Structural Analysis with the Finite Element Method." *Linear Statics Lecture Notes on Numerical Methods in Engineering and Sciences*. Barcelona: Artes Gráficas Torres S.A., 2003.
- [10] Christensen, Peter W. Klarbring, A. "An Introduction to Structural Optimization". Berlin Heidelberg, Germany: Springer-Verlag. 2008.