



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS KOMPOSISI *RUBBER* PADA *RUBBER MASS-DVA BORING BAR* UNTUK MENDAPATKAN REDUKSI RESPON GETARAN PADA PROSES *BORING* DI MESIN *LATHE*

IKRALHAQ HILLIRIANY ADRIADI

NRP 02111840000099

Dosen Pembimbing

Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

NIP 19700412 199703 2 003

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS KOMPOSISI *RUBBER* PADA *RUBBER MASS-DVA BORING BAR* UNTUK MENDAPATKAN REDUKSI RESPON GETARAN PADA PROSES *BORING* DI MESIN *LATHE*

IKRALHAQ HILLIRIANY ADRIADI

NRP 0211184000099

Dosen Pembimbing

Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

NIP 19700412 199703 2 003

Program Studi Sarjana

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

ANALYSIS OF RUBBER COMPOSITION ON RUBBER MASS-DVA BORING BAR TO GET REDUCTION OF VIBRATION RESPONSE IN BORING PROCESS IN LATHE MACHINE

IKRALHAQ HILLIRIANY ADRIADI

NRP 02111840000099

Advisor

Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

NIP 19700412 199703 2 003

Mechanical Engineering Undergraduate Study Program

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN





ANALISIS KOMPOSISI *RUBBER* PADA *RUBBER MASS-DVA BORING BAR* UNTUK MENDAPATKAN REDUKSI RESPON GETARAN PADA PROSES *BORING* DI MESIN *LATHE*

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **IKRALHAQ HILLIRIANY ADRIADI**
NRP. 0211184000099

Disetujui oleh Tim Penguji Proposal Tugas Akhir:

- | | | |
|---|--|------------|
| 1. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. |  | Pembimbing |
| 2. Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng. |  | Penguji |
| 3. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. |  | Penguji |
| 4. Dinny Harnani, S.T., M.Sc. |  | Penguji |

SURABAYA
Juli, 2022

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF RUBBER COMPOSITION ON RUBBER MASS-DVA BORING BAR TO GET REDUCTION OF VIBRATION RESPONSE IN BORING PROCESS IN LATHE MACHINE

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **IKRALHAQ HILLIRIANY ADRIADI**
NRP. 0211184000099

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.



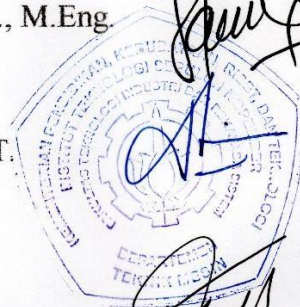
Advisor

2. Prof. Dr. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.



Examiner

3. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T.



Examiner

4. Dinny Harnani, S.T., M.Sc.



Examiner

SURABAYA

July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Ikralhaq Hilliriany Adriadi / 0211184000099

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T./ 197004121997032003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Analisis Komposisi *Rubber* Pada *Rubber Mass-Dva Boring Bar* Untuk Mendapatkan Reduksi Respon Getaran Pada Proses *Boring* Di Mesin *Lathe*” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.


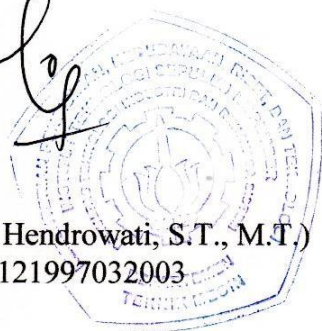
Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 26 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing

Mahasiswa,

(Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.)
NIP. 197004121997032003



(Ikralhaq Hilliriany Adriadi)
NRP. 021111841000099

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Ikralhaq Hilliriany Adriadi / 0211184000099

Department : Teknik Mesin

Advisor / NIP : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T./ 197004121997032003

hereby declare that the Final Project with the title of “Analysis of Rubber Composition on Rubber Mass-Dva Boring Bar To Get Reduction Of Vibration Response In Boring Process In Lathe Machine” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing. If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 26 July 2022

Acknowledged

Advisor

(Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.)
NIP. 197004121997032003

Student,

(Ikralhaq Hilliriany Adriadi)
NRP. 0211118410000099

ANALISIS KOMPOSISI *RUBBER* PADA *RUBBER MASS-DVA BORING BAR* UNTUK MENDAPATKAN REDUKSI RESPON GETARAN PADA PROSES *BORING* DI MESIN *LATHE*

Nama Mahasiswa : Ikralhaq Hilliriany Adriadi
NRP : 0211184000099
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

ABSTRAK

Proses permesinan merupakan proses pemotongan benda kerja dengan pembuangan sebagian material berupa *chips* (geram) sehingga menghasilkan spesifikasi geometris yang diinginkan. Terdapat berbagai macam jenis proses permesinan yang dapat dilakukan, salah satunya proses *boring*. Proses *boring* adalah proses memperbesar diameter bagian dalam benda kerja kearah radial (arah luar) dengan alat pemotong bermata tunggal yang disebut dengan *boring bar*. Ketika proses *boring* berlangsung, perlu memperhatikan berbagai faktor untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Salah satu faktor tersebut yaitu besarnya getaran sehingga dapat mengurangi performa akurasi pemotongan. Untuk mencegah timbulnya getaran berlebih, maka dapat diatasi dengan cara pemasangan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA) sebagai pereduksi getaran yang terjadi.

Pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan analisis komposisi *rubber* yang dipasang pada *boring bar* sebagai pereduksi getaran. Dalam proses penelitian, pereduksi getaran berupa karet tersebut akan dipasang secara bervariasi dengan menggunakan dua jenis karet yang berbeda. Kemudian, setelah mengetahui nilai reduksi akibat pemasangan karet, nilai tersebut akan dipotong dengan *stability*. Dalam menunjang proses penelitian simulasi ini, maka digunakan *software ANSYS Harmonic Response Analysis* untuk menganalisa reduksi getaran yang terjadi. *Boring bar* memiliki diameter 25 mm dan panjang *overhang* 200 mm atau setara dengan L/D 8. Material pada *boring bar* berupa AISI 4140 sedangkan benda kerja yang digunakan merupakan AISI 4340 dengan pemotongan diameter dalam 40 mm. Simulasi dilakukan dengan variasi *cutting parameter* diantaranya adalah variasi kecepatan *spindle*, variasi *feed rate*, dan variasi *depth of cut*.

Dari simulasi yang telah dilakukan, desain *regular boring bar* memiliki daerah operasional stabil pada 6 *cutting parameter* dengan *material removal rate* 0,6 cm²/min – 2,5 cm²/min dan respon gerak boring bar terendah yakni 0,0004 mm arah sumbu-X, 0,0171 mm arah sumbu-Y, dan 0,0084 mm arah sumbu-Z pada putaran *spindle* = 2000 rpm, *feed rate* = 0,05 mm/rev, dan *depth of cut* = 0,1 mm. Sedangkan *customized boring bar* dengan DVA mampu melakukan proses *boring* pada 12 variasi *cutting parameter* dengan *material removal rate* 0,6 cm²/min – 11,3 cm²/min dan respon gerak boring bar terendah yakni 0,00015 mm arah sumbu-X, 0,0046 mm arah sumbu-Y, dan 0,0022 mm arah sumbu-Z, pada putaran *spindle* 1250 rpm, *feed rate* 0,15 mm dan *depth of cut* 0,1 mm oleh *customized boring bar* dengan DVA NAAAAAAN. Kemudian variasi *customized boring bar* DVA ANA A ANA memiliki daerah operasional stabil yang paling luas.

Kata Kunci: *Boring bar, Dynamic Vibration Absorber, Overhang*

ANALYSIS OF RUBBER COMPOSITION ON RUBBER MASS-DVA BORING BAR TO GET REDUCTION OF VIBRATION RESPONSE IN BORING PROCESS IN LATHE MACHINE

Student Name : Ikralhaq Hilliriany Adriadi
NRP : 0211184000099
Departement : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Advisory Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T.

Abstract

The machining process is the process of cutting the workpiece by removing some of the material in the form of chips (chips) so as to produce the desired geometric specifications. There are various types of machining processes that can be carried out, one of which is the boring process. The boring process is the process of increasing the inner diameter of the workpiece in a radial direction (outward direction) with a single-edged cutting tool called a boring bar. When the boring process takes place, it is necessary to pay attention to various factors to get the desired result. One of these factors is the magnitude of the vibration so that it can reduce the performance of cutting accuracy. To prevent excessive vibration, it can be overcome by installing a Dynamic Vibration Absorber (DVA) as a vibration reducer that occurs.

In this final project, an analysis of the composition of the rubber mounted on the boring bar was carried out as a vibration reducer. In the research process, the vibration reducer in the form of rubber will be installed in various ways using two different types of rubber. In supporting this simulation research process, the ANSYS Harmonic Response Analysis software is used to analyze the vibration reduction that occurs. The boring bar has a diameter of 25 mm and an overhang length of 200 mm or equivalent to L/D 8. The material for the boring bar is AISI 4140, while the workpiece used is AISI 4340 with a cutting diameter of 40 mm. Simulations are carried out with variations in cutting parameters including variations in spindle speed, variations in feed rate, and variations in depth of cut.

From the simulations that have been carried out, the regular boring bar design has a stable operational area on 6 cutting parameters with a material removal rate of 0.6 cm²/min – 2.5 cm²/min and the lowest boring bar motion response is 0.0004 mm in the X-axis direction, 0.0171 mm in the Y-axis direction, and 0.0084 mm in the Z-axis direction at spindle rotation = 2000 rpm, feedrate = 0.05 mm/rev, and depth of cut = 0.1 mm. While the customized boring bar with DVA is able to carry out the boring process on 12 variations of cutting parameters with a material removal rate of 0.6 cm² /min – 11.3 cm² /min and the lowest boring bar motion response is 0.00015 mm in the X-axis direction, 0, 0046 mm in Y-axis direction, and 0.0022 in Z-axis direction, at 1250 rpm spindle rotation, 0.15 mm feed rate and 0.1 mm depth of cut by customized boring bar with NAAAAAAN DVA. Then the variety of customized boring bars DVA ANA A ANA has the widest stable operational area.

Keywords: *Boring bar, Dynamic Vibration Absorber, Overhang*

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **Analisis Komposisi Rubber pada Rubber Mass-DVA Boring Bar untuk Mendapatkan Reduksi Respon Getaran pada Proses Boring di Mesin Lathe**. Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk memenuhi persyaratan kelulusan program Studi Strata I di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan kepada penulis hingga akhirnya Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini, diantaranya:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Ir. Medi Adriadi Hadian dan Ibu Siti Zainab, serta kakak dan adik penulis, Achmad Riviero Adriadi dan Rekkaza Airimbang Adriadi yang telah memberikan dukungan dalam segala bentuk dan doa yang tidak ada henti-hentinya agar segala urusan penulis dimudahkan dan dilancarkan oleh Allah SWT.
2. Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan arahan selama menyusun Tugas Akhir ini.
3. Bapak Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng., Ibu Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T., dan Ibu Dinny Harnani, S.T., M. Sc., selaku dosen penguji dalam sidang Tugas Akhir penulis yang telah memberikan masukan dan saran untuk penyempurnaan Tugas Akhir ini.
4. Kelvin Pratama Indratmoko yang selalu memberikan bantuan, dukungan, dan mendampingi penulis dalam segala waktu.
5. Seluruh teman satu bimbingan (Najya Rafa Meidina, Hanifati Dwi Kusuma, Aufa Ulin Nuha, Rianti Ayu Pratiwi, Donatus Probo Adhi S., Faishal Daffa Prayudha, M. Luthfi Attaka Rizqi) yang telah menemani malam saya di Lab. Vibrasi.
6. Sabrina Yuliaputri, Nadiah Fadilah Hasan, Francis Alexander, Daffa Ramli, dan Natanael Dimas selaku teman yang selalu setia memberi nasihat, dukungan, serta bantuan semasa perkuliahan sejak mahasiswa baru hingga sekarang.
7. Amanda Rosalina selaku kakak yang selalu memberikan motivasi dan membantu penulis dalam menyelesaikan segala urusan selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
8. Seluruh pengurus Departemen Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Mesin ITS 2020/2021 yang selalu memberikan dukungan dan hiburan kepada penulis.
9. Aurora Nanda Putri dan Chowitt Sabiladini selaku teman dari Sekolah Menengah Pertama yang selalu memberikan nasihat, hiburan, dan dukungan moral kepada penulis sejak kami berteman.
10. Seluruh teman di Bandung (Marini Rizka, Rafika Halidaniar, Sabrina Kiasati, Nisrina Sofia, Astya Nurula, Felya Andhini, Frieska Kirana, Ranindya Diva) yang selalu memberikan nasihat, hiburan, dan dukungan moral kepada penulis sejak kami berteman.
11. Seluruh teman-teman angkatan M61 yang telah menemani penulis dalam mengenal dan beradaptasi pada lingkungan baru serta menjadi teman yang terbaik.
12. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademik Teknik Mesin FTI-IRS ITS, terima kasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi positif dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi para pembaca.

Surabaya, 1 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
APPROVAL SHEET.....	ix
PERNYATAAN ORISINALITAS	xi
STATEMENT OF ORIGINALITY	xiii
ABSTRAK.....	xv
ABSTRACT	xvii
KATA PENGANTAR	xix
DAFTAR ISI	xxii
DAFTAR GAMBAR	xxv
DAFTAR TABEL.....	xxxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II DASAR TEORI & TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Dasar Teori.....	3
2.1.1. Getaran <i>Multi-Degree-of-Freedom</i>	3
2.1.2. <i>Dynamic Vibration Absorber</i>	3
2.1.3. Mesin Bubut.....	7
2.1.4. Optimalisasi	11
2.2 Tinjauan Pustaka	11
1.1.	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	21
3.2 Penjelasan Tahap Penelitian.....	22
3.2.1 Studi Literatur	22
3.2.2 Identifikasi Masalah.....	22
3.2.3 Perancangan Sistem	22
3.2.4 Pemodelan Sistem Dinamis	24
3.2.5 Penurunan Persamaan Gerak	25
3.2.6 Perancangan Desain	29
3.2.7 <i>Meshing</i>	34
3.2.8 Penentuan Parameter.....	34
3.2.9 Simulasi	49
3.2.10 Reduksi Respon Getaran.....	55
3.2.11 Analisis Data dan Pembahasan	55
3.2.12 Kesimpulan	55
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	57
4.1 <i>Flowchart</i> Analisis Data	57

4.2	Analisis Respon Getaran.....	58
4.2.1.	Analisa Frekuensi Natural pada Seluruh Variasi <i>Boring Bar</i>	59
4.2.2.	Respon Getaran Boring Bar Arah Sumbu-X (Axial).....	59
4.2.3.	Respon Getaran Boring Bar Arah Sumbu-Y (Tangensial)	62
4.2.4.	Respon Getaran Boring Bar Arah Sumbu-Z (Radial).....	65
4.2.5.	Perbandingan Deformasi <i>Regular Boring Bar</i> dan <i>Customized Boring Bar</i>	67
4.3.	Analisis Pengaruh Gaya Pemotongan (F_c) dan <i>Chatter Frequency</i> (ω_c) Terhadap <i>Stability</i> 69	
4.3.1.	<i>Stability Limit</i>	69
4.3.2.	Pengaruh Gaya Pemotongan (F_c) dan <i>Chatter Frequency</i> (ω_c) Terhadap <i>Stability limit</i> 71	
4.3.3.	Pengaruh <i>Cutting Parameter</i> Finish Boring AISI 4340 Terhadap <i>Stable Response</i>	74
4.4	Analisis Reduksi Getaran <i>Boring Bar</i>	78
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		83
5.1	Kesimpulan	83
5.2	Saran	83
DAFTAR PUSTAKA		85
LAMPIRAN.....		87
BIODATA PENULIS.....		103

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Three Degree of Freedom</i> (Rao, 2011).....	3
Gambar 2. 2 <i>Undamped Dynamic Vibration Absorber</i> (Kelly, 2011).....	4
Gambar 2. 3 <i>Undamped Dynamic Vibration Absorber Effect on the Response of Main System</i> (Rao, 2011).....	5
Gambar 2. 4 <i>Dynamic Modeling of the Main System with Damped Dynamic Vibration Absorber</i> (Kelly, 2011).....	6
Gambar 2. 5 <i>Damped Vibration Absorber Effect on the Response of Main System</i> (Rao, 2011).....	7
Gambar 2. 6 <i>Lathe Machine Components</i> (Kalpakjian & Schmid, 2001).....	8
Gambar 2. 7 (a) <i>Rotating Movement of Workpiece</i> , (b) <i>Depth of Cut</i>	9
Gambar 2. 8 <i>Machining Process of Lathe Machine</i> (a) <i>chamfering</i> , (b) <i>pembubutan alur parting-off</i> , (c) <i>threading</i> , (d) <i>boring</i> , (e) <i>drilling</i> , and (f) <i>knurling</i> . (Widarto, 2008).....	9
Gambar 2. 9 <i>Three Dimension System of Cutting Force</i> (Fountas et al., 2019).....	10
Gambar 2. 10 <i>General recommendation for turning operation</i> (Kalpakjian & Schmid, 2001).....	11
Gambar 2. 11 <i>Variation Models of Boring Bar with</i> (a) <i>Regular Boring Bar L/D 4</i> , (b) <i>Customized Boring Bar L/D 8 with 5 Natural Rubber DVA</i> , and (c) <i>Customized Boring Bar L/D 8 with 8 Natural Rubber DVA</i> (Merdekawan, 2020).....	12
Gambar 2. 12 <i>Cutting Parameters on Stable Zone Customized Boring Bar Design with 8 Natural Rubber</i> (Merdekawan, 2020).....	13
Gambar 2. 13 <i>Main system with 5 position variations of DVA rubber</i> (Nugraha, 2020).....	13
Gambar 2. 14 <i>Boring Bar Illustration and Dynamic Model with VSDVA</i> (Liu et al., 2018)..	14
Gambar 2. 15 <i>Boring Bar Parameter and VSDVA</i> (Liu et al., 2018).....	14
Gambar 2. 16 <i>Simulation Graph of Amplitude Ratio with Frequency Ratio</i> (Liu et al., 2018).....	15
Gambar 2. 17 <i>Stable and unstable diagrams on the results of drilling experiments</i> (Liu et al., 2018).....	15
Gambar 2. 18 <i>Model 2 DOF Damped DVA</i> (Pachpute & Bawa, 2015).....	16
Gambar 2. 19 <i>Main System Response with $(\mu) = 0.2$ and tuning ratio $(f) = 0.7$ to 0.8</i>	16
Gambar 2. 20 <i>Main System Response with $\mu = 0.2$, $\xi = 0.125$, $f = 0.9$ to 1.0</i>	17
Gambar 2. 21 <i>Tuned Mass Damper Schematic on Boring Bar</i> (Yadav et al., 2020).....	17
Gambar 2. 22 <i>The Effect of DVA Position on</i> (a) <i>Optimization of the Frequency Ratio Compared to the Increase in Mass Ratio</i> , and (b) <i>Optimization of the Attenuation Ratio Compared to the Mass Ratio</i> (Yadav et al., 2020).....	18
Gambar 2. 23 <i>Comparison Graph of Chatter Frequency Based on Experimental Results and Mathematical Calculation Results</i> .(Ugochukwu et al., 2017).....	19
Gambar 3. 1 <i>Flowchart Penelitian</i>	22
Gambar 3. 2 <i>Customized Boring Bar without DVA</i>	23
Gambar 3. 3 <i>DVA</i>	24
Gambar 3. 4 <i>Boring Process</i>	24
Gambar 3. 5 <i>Main system dynamic model</i> (a) <i>without DVA</i> (b) <i>with DVA</i>	25
Gambar 3. 6 <i>Free Body Diagram of Main System Without DVA</i>	25
Gambar 3. 7 <i>Free Body Diagram of Main System With DVA</i>	27
Gambar 3. 8 <i>Dimension of Regular Boring Bar</i>	30

Gambar 3. 9 <i>Enginerring Drawing (a) Top View, (b) Side View, and (c) Front View of Customized Boring Bar</i>	31
Gambar 3. 10 <i>Specification of Customized Boring Bar</i>	32
Gambar 3. 11 <i>Carbide Insert</i>	33
Gambar 3. 12 <i>Mass Ring</i>	33
Gambar 3. 13 <i>DVA Rubber</i>	34
Gambar 3. 14 <i>Mesh</i>	34
Gambar 3. 15 (a) <i>Simulation of static deformation of regular boring bar and (b) Simulation of static deformation of customized boring bar</i>	35
Gambar 3. 16 <i>Force on Machining Process</i>	38
Gambar 3. 17 <i>Simulation of y-axis static deflection (a) regular boring bar and (b) customized boring bar</i>	39
Gambar 3. 18 <i>Simulation of y-axis static deflection of regular boring bar with given input force (a) 100 N and (b) 200 N</i>	40
Gambar 3. 19 <i>Simulation of y-axis static deflection customized boring bar with given input force (a) 100 N and (b) 200 N</i>	41
Gambar 3. 20 <i>Simulation of natural frequency modal analysis (a) regular boring bar and (b) customized boring bar</i>	43
Gambar 3. 21 <i>Mass Properties of (a) Regular Boring Bar and (b) Customized Boring Bar</i> ...	43
Gambar 3. 22 <i>Ansys Properties of Mass Ring</i>	45
Gambar 3. 23 <i>Static Deformation (a) neoprene rubber dan (b) natural rubber</i>	45
Gambar 3. 24 <i>Natural DVA Frequency Simulation with 2 Rubber Materials (a) Neoprene Rubber and (b) Natural Rubber</i>	46
Gambar 3. 25 <i>Ansys Properties of (a) DVA Natural Rubber and (b) DVA Neoprene Rubber</i>	47
Gambar 3. 26 <i>Customized Geometry Boring Bar with 6 Position Variations of DVA Rubber</i> 50	
Gambar 3. 27 (a) <i>Rough connection dan (b) bonded connection</i>	52
Gambar 3. 28 (a) <i>Mesh (b) mesh quality (c) quality parameter orthogonal quality</i>	53
Gambar 3. 29 (a) <i>Excitation force at the edge of the boring bar blade (b) fixed support at the back of the boring bar</i>	53
Gambar 3. 30 <i>Ansys modal analysis and harmonic response workbench setup</i>	54
Gambar 3. 31 <i>Solution frequency response deformation pada ujung insert (a) dan pada DVA (b)</i>	54
Gambar 4. 1 <i>Flowchart Data Analysis</i>	58
Gambar 4. 2 <i>X-Axis of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram</i>	59
Gambar 4. 3 <i>X-Axis Zoom in View of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram</i>	61
Gambar 4. 4 <i>Y-Axis of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram</i>	62
Gambar 4. 5 <i>Y-Axis Zoom in View of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram</i>	64
Gambar 4. 6 <i>Z-Axis of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram</i>	65
Gambar 4. 7 <i>Z-Axis Zoom in View of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram</i>	67
Gambar 4. 8 <i>Total deformation simulation for (a) Regular boring bar (b) Customized boring bar with ANA A ANA (c) Customized boring bar with NANANANA</i>	68

Gambar 4. 9 <i>Motion Response of Regular Boring Bar L/D Overhang 4 on Boring Process with MRR 25 cm²/min Direction (a) X-axis (b) Y-axis (c) Z-axis (Merdekawan, 2020)</i>	71
Gambar 4. 10 <i>3D Plot of Customized Boring Bar Motion Response with DVA NANANANA Direction (a) X-axis, (b) Y-axis, and (c) Z-axis at Cutting Force 0 N – 400 N</i>	72
Gambar 4. 11 <i>3D Plot of Customized Boring Bar Motion Response with DVA NANANANA Direction (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis on cutting force 0 N – 400 N with Stable Limit on Each Axis</i>	73
Gambar 4. 12 <i>Surface Plot of Stable Motion Response Customized Boring Bar with DVA NANANANA Direction (a) X-axis, (b) Y-axis, and (c) Z-axis at cutting force 0 N – 400 N</i>	74
Gambar 4. 13 <i>Scatter Plot 27 cutting parameter proses boring AISI 4340 tipikal finishing</i> ...	74
Gambar 4. 14 <i>Stable Zone Customized Boring Bar NANANANA</i>	75
Gambar 4. 15 <i>27 Cutting Parameter in Stable Zone from 6 Boring Bar Designs</i>	76
Gambar 4. 16 <i>45 Cutting Parameters in Stable Zone Customized Boring Bar with (a) 8 Neoprene Rubber DVA and (b) 8 Natural Rubber (Merdekawan, 2020)</i>	77

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>Parameter Variation Table</i> (Pachpute & Bawa, 2015)	16
Tabel 2. 2 <i>Main System Motion Response with Various DVA Parameters</i> (Pachpute & Bawa, 2015).....	16
Tabel 2. 3 <i>Comparison of Experimental Data and Calculation Results.</i> (Ugochukwu et al., 2017).....	19
Tabel 3. 1 <i>Specification Material Properties of Customized Boring Bar</i>	32
Tabel 3. 2 <i>Cutting Parameter</i>	37
Tabel 3. 3 <i>Excitation Force</i>	38
Tabel 3. 4 <i>Effect of Force Variation on Boring Bar Stiffness Value</i>	41
Tabel 3. 5 <i>Mass Value Parameter of Boring Bar</i>	44
Tabel 3. 6 <i>Parameters in Boring Bar Research</i>	44
Tabel 3. 7 <i>Mass Value Parameter of Rubber</i>	47
Tabel 3. 8 <i>DVA Variation Parameters</i>	49
Tabel 3. 9 <i>Material Properties</i>	49
Tabel 4. 1 <i>Natural Frequency Data of Customized Boring Bar DVA ANA N ANA for Each Mode Shape</i>	59
Tabel 4. 2 <i>The Frequency of The Damping Area of The Boring Bar in The Axial Direction</i> ..	61
Tabel 4. 3 <i>The Frequency of The Damping Area of The Boring Bar in The Tangential Direction</i>	63
Tabel 4. 4 <i>The Frequency of The Damping Area of The Boring Bar in The Radial Direction</i> ..	66
Tabel 4. 5 <i>Cutting Parameter of Regular Boring Bar L/D overhang 4</i>	69
Tabel 4. 6 <i>12 Typical Finishing Cutting Parameters Capable of Stably Boring Process Using 6 Boring Bar Designs</i>	77
Tabel 4. 7 <i>Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in x-axis</i>	78
Tabel 4. 8 <i>Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in y-axis</i>	79
Tabel 4. 9 <i>Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in z-axis</i>	79
Tabel 4. 10 <i>Response and Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in all axis</i>	80

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses permesinan merupakan proses pemotongan benda kerja dengan pembuangan sebagian material berupa *chips* (geram) sehingga menghasilkan spesifikasi geometris yang diinginkan. Terdapat berbagai macam jenis proses permesinan yang dapat dilakukan, salah satunya proses *boring*. Proses *boring* adalah proses memperbesar diameter bagian dalam benda kerja kearah radial (arah luar) dengan alat pemotong bermata tunggal yang disebut dengan *boring bar*. Kualitas pengeboran ditentukan oleh berbagai aspek, salah satunya adalah getaran. Besarnya getaran pada proses *boring* disebabkan oleh faktor-faktor lain seperti antara pemakan mata bor dengan benda kerja, kecepatan putaran, serta kedalaman potong yang dapat mengurangi kinerja akurasi pemotongan. Akibatnya, lambat laun getaran dapat merusak berbagai komponen mesin dalam jangka waktu tertentu serta dapat mengurangi kualitas permesinan seperti timbulnya *chatter* pada permukaan benda kerja. Hal tersebut dapat mengurangi umur pakai dari mesin. Maka dari itu, untuk meningkatkan kualitas pengeboran dan kinerja dari mesin, penggunaan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA) pada *boring bar* dapat dijadikan sebuah solusi untuk mereduksi getaran yang terjadi pada mesin. Desain DVA yang tepat juga perlu dipertimbangkan agar *boring bar* mampu stabil beroperasi pada *stability zone*.

Penambahan komponen reduksi getaran dengan menggunakan DVA sebelumnya telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya yaitu penelitian yang dilakukan oleh Lie Li, Beibei Sun, dan Haitao Hua pada tahun 2019 mengenai analisis karakteristik vibrasi pada *boring bar* dengan variabel kekakuan DVA. Dalam penelitian ini, *boring bar* dengan variasi kekakuan DVA dan penambahan *rubber bush* (karet) yang diletakkan di dalam DVA dianalisis. Digunakan *boring bar* dengan diameter 40 mm dan panjang 310 mm, nilai kekakuan pada *absorber* divariasikan dengan memutar *knob* yang memberikan kompresi aksial pada *rubber bush* sebagai kekakuan *absorber* guna mendapatkan nilai kekakuan *absorber* yang optimal pada proses pengeboran tertentu. Mereduksi getaran dengan penambahan DVA juga pernah dimodelkan dan disimulasikan oleh Nugraha Merdekawan. Penelitian dengan judul “Pemodelan dan Analisis Respon Getaran *Boring Bar* pada *Internal Turning* akibat Pengaruh Variasi Jumlah dan Jenis Karet DVA pada Gaya Pemotongan Tipikal *Finishing*” dilakukan dengan membuktikan bahwa variasi kombinasi karet DVA berupa *neoprene rubber* dan *natural rubber* memengaruhi reduksi respon getaran utama dengan parameter variasi pemotongan (*depth of cut*). Hasil simulasi berupa *bode diagram* dengan grafik deformasi dan frekuensi masing-masing pada sumbu x, y, dan z.

Berdasarkan penelitian mengenai proses pengeboran yang sudah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya, perlu adanya analisis komposisi *rubber* pada *rubber mass-DVA boring bar* untuk mendapatkan reduksi respon getaran pada proses *boring* di mesin *lathe*. Dalam penelitian simulasi ini akan dilakukan pemodelan analisis reduksi respon getaran pada *boring bar* dengan menggunakan DVA berupa variasi kombinasi karet. Sebagai dasaran, penelitian ini mengacu pada teori mekanika getaran dan beberapa tinjauan pustaka. Penambahan DVA dilakukan dengan cara mengurangi diameter pada bagian depan *boring bar* sebagai tempat untuk meletakkan DVA. Parameter yang digunakan pada simulasi ini yaitu variasi jumlah dan peletakan kombinasi karet DVA. Dengan dilaksanakannya penelitian ini, diharapkan dapat mengetahui pengaruh variasi kombinasi karet DVA dan mengetahui pengaruh variasi parameter pemotongan pada *boring bar* terhadap reduksi getaran.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana rancangan dan mekanisme DVA pada proses *boring* di mesin *lathe*?
2. Bagaimana pengaruh variasi kombinasi susunan *rubber mass* DVA terhadap reduksi respon getaran pada proses *boring* di mesin *lathe*?
3. Bagaimana pengaruh variasi parameter pemotongan terhadap reduksi respon getaran pada proses *boring* di mesin *lathe*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui rancangan dan mekanisme DVA pada proses *boring* di mesin *lathe*.
2. Mengetahui pengaruh variasi kombinasi susunan *rubber mass* DVA terhadap reduksi respon getaran pada proses *boring* di mesin *lathe*.
3. Mengetahui pengaruh variasi parameter pemotongan terhadap reduksi respon getaran pada proses *boring* di mesin *lathe*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Material benda kerja yang digunakan adalah AISI 4340.
2. Parameter yang didapatkan didasari oleh hasil simulasi sebelumnya.
3. Nilai konstanta redaman untuk jenis material metal dan jenis material karet dianggap sama.
4. Benda kerja dianggap tidak bergetar.
5. Tidak ada slip yang terjadi diantara *clamp* dan *boring bar*.
6. Sumber dan analisis getaran terleta tepat diujung *insert*.
7. *Connection* antara karet dengan *body boring bar* adalah *rough*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sebagai penerapan ilmu pengetahuan dibidang industri dalam mereduksi getaran yang berlebih pada permesinan khususnya mesin bubut.
2. Memberikan kontribusi dalam meningkatkan kualitas hasil pengeboran pada permesinan.
3. Dapat digunakan sebagai referensi dan studi literatur dalam melakukan penelitian selanjutnya mengenai reduksi getaran dengan penggunaan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA) pada mesin bubut.

BAB II DASAR TEORI & TINJAUAN PUSTAKA

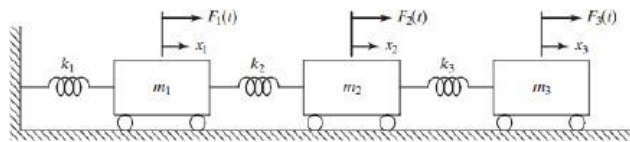
2.1 Dasar Teori

2.1.1. Getaran *Multi-Degree-of-Freedom*

Degree of freedom atau derajat kebebasan adalah koordinat independen (*Independent coordinate*) yang dibutuhkan untuk menyatakan posisi dari suatu sistem terhadap suatu referensi yang dianggap diam. Secara garis besar derajat kebebasan dapat dibagi menjadi dua, yaitu satu derajat kebebasan (*Single of Freedom*) untuk sistem yang gerakannya dapat digambarkan dengan satu koordinat dan multi derajat kebebasan (*Multi Degree of Freedom*) untuk sistem yang gerakannya digambarkan oleh lebih dari satu koordinat. Pada perancangan ini akan digunakan sistem *Multi Degree of Freedom* (M.D.O.F). Persamaan gerak untuk sistem MDOF didapat dari penurunan Hukum Newton kedua, yaitu

$$\sum f = m \times a \dots\dots\dots(2.1)$$

Pada sistem MDOF, digunakan persamaan matriks untuk mempresentasikan sistem karena memiliki penyelesaian aljabar yang kompleks. Sistem *Multi Degree of Freedom* dapat dimodelkan seperti gambar berikut.



Gambar 2. 1 *Three Degree of Freedom* (Rao, 2011)

Dari gambar 2.1 di atas, maka akan didapatkan matriks dari persamaan gerak dengan menggunakan Hukum Newton kedua yang diberikan untuk masing-masing massa.

$$m_i \ddot{x}_i + k_i x_i = \sum_i F_i \dots\dots\dots(2.2)$$

Persamaan di atas terdiri dari $i=1$, $i=2$ dan $i=3$ sehingga dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}; [k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}; [F] = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{bmatrix} \dots\dots(2.3)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan (2.2) ke persamaan (2.1), maka akan didapatkan persamaan (2.4) sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix} \dots\dots(2.4)$$

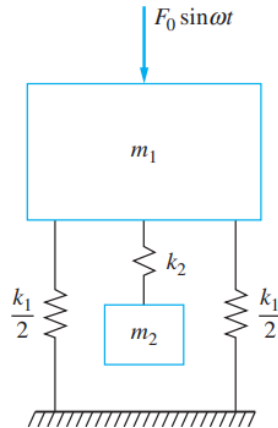
2.1.2. *Dynamic Vibration Absorber*

Dynamic Vibration absorber (DVA) atau penyerap getaran dinamis merupakan salah satu proses *vibration control* yang dikenakan pada sistem dengan didukung oleh pegas-peredam yang berfungsi untuk mengurangi atau menghilangkan efek getaran yang tidak diinginkan. *Absorber* tersebut dapat berupa sistem massa dan pegas yang dipasangkan pada sistem sumber getar yang akan direduksi getarannya. Pemasangan massa *absorber* pada massa utama akan menghasilkan sistem dengan 2 DOF, sehingga sistem tersebut akan memiliki dua frekuensi

natural. Terdapat dua macam DVA yaitu *Undamped Vibration Absorber* (DVA tidak teredam) dan *Damped Vibration Absorber* (DVA teredam).

1. Undamped Dynamic Vibration Absorber

Skema dari *undamped dynamic vibration absorber* yang dipasang pada sistem utama digambarkan seperti berikut.



Gambar 2. 2 *Undamped Dynamic Vibration Absorber* (Kelly, 2011)

Dengan menganalisis persamaan gerak dari massa utama (m_1) dan massa absorber (m_2), maka didapatkan persamaan gerak sebagai berikut.

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2(x_1 - x_2) = F_0 \sin \omega t \dots\dots\dots(2.5)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) = 0 \dots\dots\dots(2.6)$$

Dengan mengansumsikan $x_j(t) = X_j \sin \omega t; j = 1,2$ sehingga didapatkan amplitudo *steady state* dari massa utama (m_1) dan massa *absorber* (m_2) yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2 \omega^2) F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

Untuk meredam getaran dapat dilakukan dengan mereduksi amplitude dari massa utama (X_1). Maka nilai nol didapatkan jika numerator dari persamaan 2.6 juga bernilai nol, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} \dots\dots\dots(2.9)$$

Ketika massa utama (m_1) dioperasikan pada daerah resonansi, maka didapatkan.

$$\omega_1 \approx \omega_2 = \frac{k_1}{m_1} \dots\dots\dots(2.10)$$

Sehingga didapatkan persamaan.

$$\omega^2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \dots\dots\dots(2.11)$$

Sistem utama yang beroperasi pada frekuensi resonansi, maka amplitude dari gerakan mesin utama akan menjadi nol, maka dapat dituliskan.

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \text{ sebagai frekuensi sistem utama, dan}$$

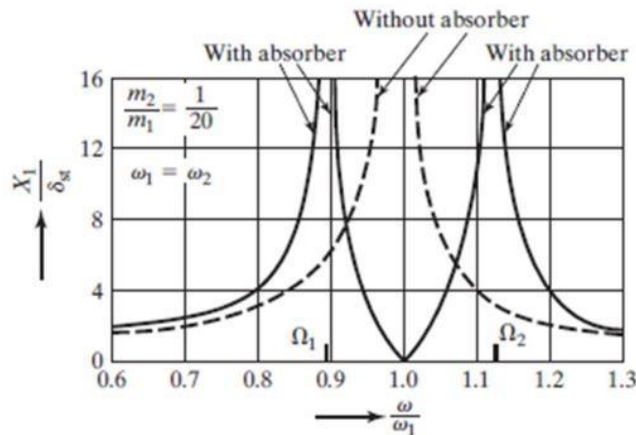
$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \text{ sebagai frekuensi natural sistem utama}$$

Sebagai frekuensi natural pada sistem DVA, maka didapatkan persamaan sebagai berikut.

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \dots \dots \dots (2.14)$$

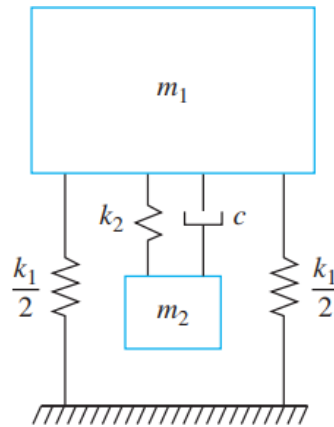
Gambar 2.3 yang merupakan skema efek penggunaan DVA pada rasio amplitudo respon getaran terhadap defleksi statis sistem utama dengan rasio frekuensi operasional terhadap frekuensi natural sistem.



Gambar 2.3 Undamped Dynamic Vibration Absorber Effect on the Response of Main System (Rao, 2011)

2. Damped Dynamic Vibration Absorber

Damped dynamic vibration absorber merupakan DVA yang berfungsi untuk menghasilkan dua puncak frekuensi natural baru serta mereduksi amplitudo tersebut. Amplitudo yang direduksi dari mesin dilakukan dengan menambahkan komponen peredam seperti skema dibawah ini.



Gambar 2. 4 *Dynamic Modeling of the Main System with Damped Dynamic Vibration Absorber (Kelly, 2011)*

Berdasarkan gambar 2.4, didapatkan persamaan gerak dari massa utama (m_1) dan massa absorber (m_2) seperti berikut.

$$m_1\ddot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0\sin \omega \dots\dots\dots(2.15)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = 0 \dots\dots\dots(2.16)$$

Dengan mengansumsikan $x_j(t) = X_j\sin \omega t; j = 1,2$ sehingga didapatkan amplitudo *steady state* dari massa utama (m_1) dan massa absorber (m_2) yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega^2)}{[(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2] + ic_2\omega(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)} \dots\dots\dots(2.17)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 - ic_2\omega^2)}{(k_2 - m_2\omega^2 - ic_2\omega)} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dengan:

$$\mu = \frac{m_2}{m_1} = \text{mass ratio}$$

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1} = \text{static deflection of the sistem}$$

$$\omega_a^2 = \frac{k_2}{m_2} = \text{square of natural frequency of the absorber}$$

$$\omega_n^2 = \frac{k_1}{m_1} = \text{square of natural frequency of main mass}$$

$$f = \frac{\omega_a}{\omega_n} = \text{ratio of natural frequency}$$

$$g = \frac{\omega}{\omega_n} = \text{forced frequency ratio}$$

$$cc = 2m\omega_n = \text{critical damping constant}$$

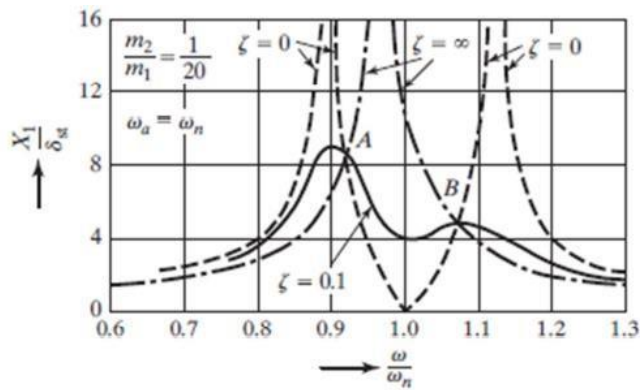
$$\zeta = \frac{c_2}{c_c} = \text{damping ratio}$$

Sehingga nilai X_1 dan X_2 dapat dinyatakan dalam.

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 f^2)^2}{\{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu 2\zeta g^2)^2 + (\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2))\}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.19)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{\{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu 2\zeta g^2)^2 + (\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2))\}^2} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (2.20)$$

Persamaan diatas menunjukkan bahwa nilai amplitudo vibrasi dari massa utama merupakan fungsi dari μ , f , g , dan ζ . Berdasarkan respon gerak pada persamaan diatas dapat dibentuk grafik hubungan antara rasio amplitudo respon terhadap defleksi statis sistem utama dengan rasio frekuensi operasional terhadap frekuensi natural sistem dengan nilai $\zeta = 0,1$ dapat digambarkan sebagai berikut.

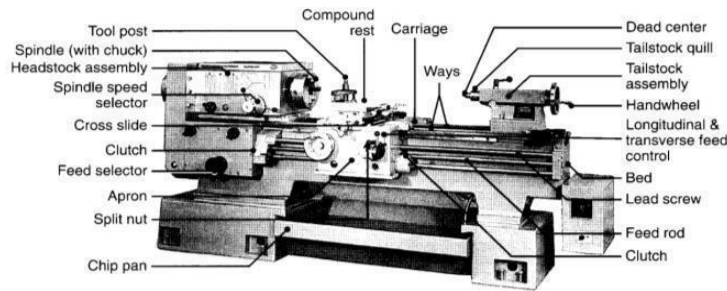


Gambar 2. 5 *Damped Vibration Absorber Effect on the Response of Main System* (Rao, 2011)

2.1.3. Mesin Bubut

Mesin bubut merupakan mesin yang tertua yang telah diciptakan. Mesin bubut paling umum disebut dengan *engine lathe* karena digerakkan dengan *overhead pulleys* dan *belts* dari mesin terdekat yang diletakkan diatas lantai pabrik. Namun saat ini mesin bubut modern sudah dilengkapi dengan motor listrik sendiri. Biasanya mesin bubut memiliki kecepatan operasi maksimum sebesar 4000 rpm, namun untuk mesin bubut yang besar hanya memiliki kecepatan sampai 200 rpm. Kekurangan dari mesin ini adalah mesin bubut kurang efisien jika digunakan untuk operasi yang berulang kali dan dalam jumlah yang besar.

Mesin bubut terdiri dari beberapa komponen seperti *carriage*, *bed*, *headstock*, *tailstock*, *feed rod*, dan *lead screw*. Bagian-bagian tersebut dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini. Berikut merupakan bagian dari mesin bubut beserta fungsinya.



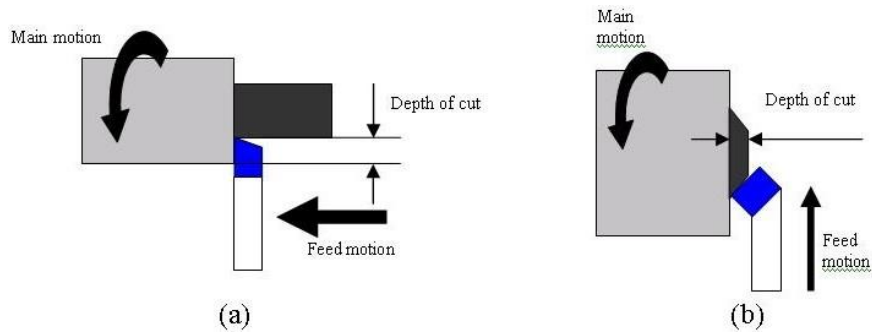
Gambar 2.6 *Lathe Machine Components* (Kalpakjian & Schmid, 2001)

1. *Bed*. *Bed* menopang semua komponen utama dari mesin bubut. Bagian ini didesain dengan kekakuan yang tinggi, biasanya dibuat dari *gray* atau *nodular cast iron*.
2. *Carriage*. *Carriage* terdiri dari mekanisme *cross-slide*, *tool post*, dan apron. Pahat diletakkan pada *tool post*, biasanya dilengkapi dengan *compound rest* yang dapat berputar untuk mengatur dan memosisikan pahat. *Cross-slide* bergerak ke arah *radial* masuk dan keluar, mengontrol pergerakan pahat ke arah *radial* saat proses permesinan seperti halnya proses *facing*. Apron memiliki mekanisme pergerakan *power screw* manual maupun otomatis.
3. *Headstock*. *Headstock* merupakan bagian yang menjadi satu dengan *bed* yang dilengkapi dengan motor, *pulleys*, dan *V-belts* yang mana menyuplai tenaga pada *spindle* pada berbagai macam kecepatan putar. Kecepatan putar dapat diatur dengan *controller* manual atau dengan *electrical controls*. Sebagian besar *headstock* dilengkapi dengan *gear set* dan memiliki berbagai cara guna memberikan kecepatan kontinyu pada *spindle*.
4. *Tailstock*. *Tailstock* berfungsi untuk membantu menopang benda kerja saat dibutuhkan. Dapat juga digunakan untuk melakukan operasi *drilling*.
5. *Feed rod* dan *lead screw*. *Feed rod* digerakkan oleh serangkaian *gear* melalui *headstock*. Ketika mesin beroperasi, *feed rod* berputar dan menghasilkan pergerakan *carriage* dan *cross-slide* dengan rasio gear, gesekan kopling, dan alur sepanjang *feed rod*.

1. Proses Pembubutan

Mesin bubut adalah suatu mesin perkakas yang digunakan untuk memotong benda atau menyayat benda yang berputar. Bubut sendiri merupakan suatu proses pemakanan benda kerja yang sayatannya dengan cara memutar benda kerja kemudian pada pahat digerakkan dengan translasi sejajar dengan sumbu putar dari benda kerja. Gerakan putar dari benda kerja disebut gerak potong relatif dan gerakan translasi dari pahat disebut gerak umpan. Dengan mengatur perbandingan kecepatan rotasi benda kerja dan kecepatan translasi pahat maka akan diperoleh berbagai macam ulir dengan ukuran kisar yang berbeda. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menukar roda gigi translasi yang menghubungkan poros *spindle* dengan poros ulir.

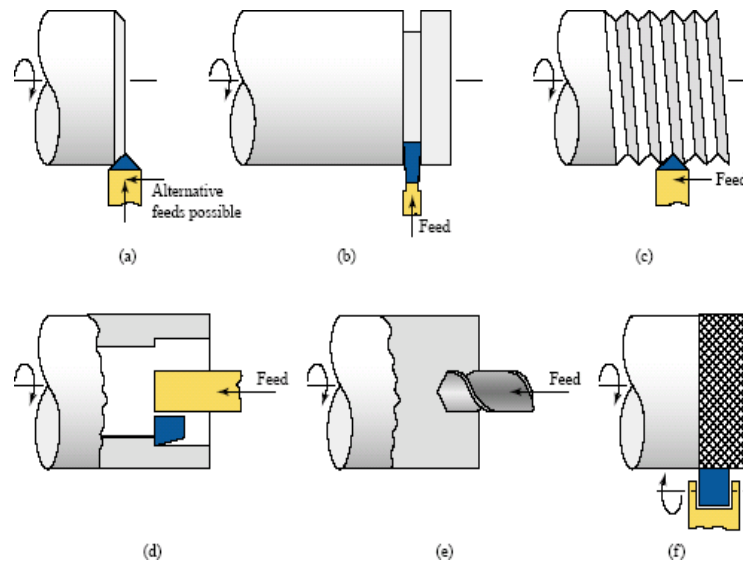
Proses bubut adalah proses pemesinan untuk menghasilkan bagian-bagian mesin berbentuk silindris yang dikerjakan dengan menggunakan mesin bubut. Prinsip dasarnya proses pembentukan benda kerja dengan mengurangi material (*material removal*). Pengurangan material dilakukan pada benda kerja yang berputar dengan alat potong (pahat) yang bergerak secara linear (melintang, memanjang, atau membentuk sudut), sehingga benda kerja yang dihasilkan umumnya memiliki penampang berbentuk lingkaran.



Gambar 2. 7 (a) *Rotating Movement of Workpiece*, (b) *Depth of Cut*

Prinsip kerja atau gerakan utama untuk melakukan pemakanan dalam proses bubut ada tiga, yaitu.

- Main motion*, yaitu: gerakan benda kerja berputar
- Adjusting motion*, yaitu: gerakan pahat memasukkan kedalaman pemakanan
- Feed motion*, yaitu: gerakan pahat menyayat benda kerja atau disebut juga gerak umpan.



Gambar 2. 8 *Machining Process of Lathe Machine* (a) *chamfering*, (b) *pembubutan alur parting-off*, (c) *threading*, (d) *boring*, (e) *drilling*, and (f) *knurling*. (Widarto, 2008)

Terdapat berbagai macam proses permesinan yang dapat dilakukan oleh mesin bubut, sebagaimana gambar 2.8 diatas. Berikut merupakan penjelasan mengenai proses-proses tersebut.

- Pembubutan pinggul (chamfering)*:
Proses pembuatan benda kerja untuk membuat *chamfer* atau untuk menumpulkan benda kerja dengan sudut tertentu sesuai dengan kebutuhan dan keinginan.
- Pembubutan alur (parting-off)*:
Pembubutan dimana pahat bubut bergerak sejajar maupun tegak lurus terhadap sumbu benda kerja. Sesuai dengan namanya, *parting* digunakan untuk memotong atau memisahkan benda kerja.
- Pembubutan ulir (threading)*:
Pembuatan ulir eksternal dan internal.
- Pembubutan lubang (boring)*:

Perbesaran lubang atau cylindrical cavity yang telah dibuat oleh proses permesinan sebelumnya atau sebagai pembuatan alur silindris pada bagian dalam.

- e. Pembuatan lubang (*drilling*):
Pembuatan lubang yang mana biasanya diikuti dengan proses *boring* guna meningkatkan akurasi dimensi dan kehalusan permukaan.
- f. Pembuatan kartel (*knurling*):
Pembuatan profil kasar pada permukaan silindris bagian luar, sebagai pembuatan *knob* dan *handle*.

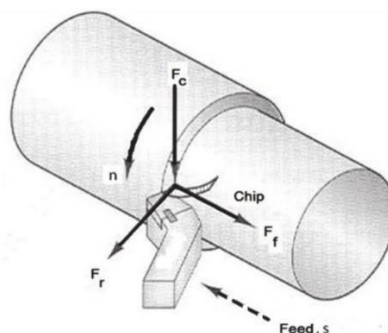
2. Gaya-gaya pada Proses Pengeboran

Pada prinsipnya terdapat tiga gaya yang bekerja pada saat proses pengeboran, yaitu axial, radial, dan tangensial. Gaya ini sangatlah penting dalam berjalannya proses pengeboran secara optimal. Pada gambar 2.8 diatas terdapat gaya yang terjadi pada saat berlangsungnya proses permesinan, yaitu gaya pemotongan gaya tangensial / *cutting force* (F_c), gaya aksial / *thrust force* (F_t) dan gaya radial / *radial force* (F_r).

Cutting force (F_c) bekerja kearah bawah pada bagian ujung pahat dan mengakibatkan pahat terdefleksi kebawah sedangkan benda kerja terdefleksi keatas. *Cutting force* memberikan energi yang dibutuhkan pada proses pemakanan benda kerja. Penentuan *cutting force* didapat dari perkalian antara spesifik energi per unit volume tiap material dengan *material removal rate* (*MRR*). Perkalian dari *cutting force* dengan jari-jari benda kerja merupakan nilai dari torsi yang bekerja pada *spindle*. Sedangkan perkalian dari torsi *spindle* dan kecepatan putar merupakan nilai dari power yang dibutuhkan.

Thrust force (F_t) bekerja pada arah longitudinal. *Thrust force* juga biasa disebut dengan *feed force* karena bekerja pada arah pemakanan pahat atau gaya yang bekerja kearah sumbu putar dari benda. Gaya ini mendorong pahat berlawanan arah dari arah pemakanan.

Radial force (F_r) bekerja pada arah *radial* dan mendorong pahat menjauhi benda kerja. Dikarenakan banyak faktor yang mempengaruhi proses pemotongan, *thrust force* (F_t) dan *radial force* (F_r) sangat sulit untuk dihitung secara matematis karena kedua gaya tersebut biasanya didapatkan secara eksperimental jika dibutuhkan.



Gambar 2. 9 Three Dimension System of Cutting Force (Fountas et al., 2019)

Gaya aksial dianggap diaaikan karena nilai gaya tersebut relatif kecil, sedangkan gaya tangensial dapat dihitung dengan menggunakan rumus.

$$P = F_c \times V = E \times MRR \dots\dots\dots (2.21)$$

$$F_c = \frac{E \times MRR}{V} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dimana:

- P = Power
- Fc = Cutting force
- V = Cuttingspeed
- E = Specific energy
- MRR = Material removal rate

MRR dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut.

$$MRR = d f V \dots\dots\dots(2.23)$$

Dimana:

- d = Depth of cut
- f = Feeds
- v = Cutting speeds

Adapun rekomendasi parameter *Depth of Cut* bisa dilihat pada tabel dibawah ini.

General Recommendations for Turning Operations							
Workpiece material	Cutting tool	General-purpose starting conditions			Range for roughing and finishing		
		Depth of cut, mm	Feed, mm/rev	Cutting speed, m/min	Depth of cut, mm	Feed, mm/rev	Cutting speed, m/min
Low-C and free machining steels	Uncoated carbide	1.5-6.3	0.35	90	0.5-7.6	0.15-1.1	60-135
	Ceramic-coated carbide	"	"	245-275	"	"	120-425
	Triple-coated carbide	"	"	185-200	"	"	90-245
	TiN-coated carbide	"	"	105-150	"	"	60-230
	Al ₂ O ₃ ceramic	"	0.25	395-440	"	"	365-550
	Cermet	"	0.30	215-290	"	"	105-455
Medium and high-C steels	Uncoated carbide	1.2-4.0	0.30	75	2.5-7.6	0.15-0.75	45-120
	Ceramic-coated carbide	"	"	185-230	"	"	120-410
	Triple-coated carbide	"	"	120-150	"	"	75-215
	TiN-coated carbide	"	"	90-200	"	"	45-215
	Al ₂ O ₃ ceramic	"	0.25	335	"	"	245-455
	Cermet	"	0.25	170-245	"	"	105-305

Gambar 2. 10 General recommendation for turning operation (Kalpakjian & Schmid, 2001)

2.1.4. Optimalisasi

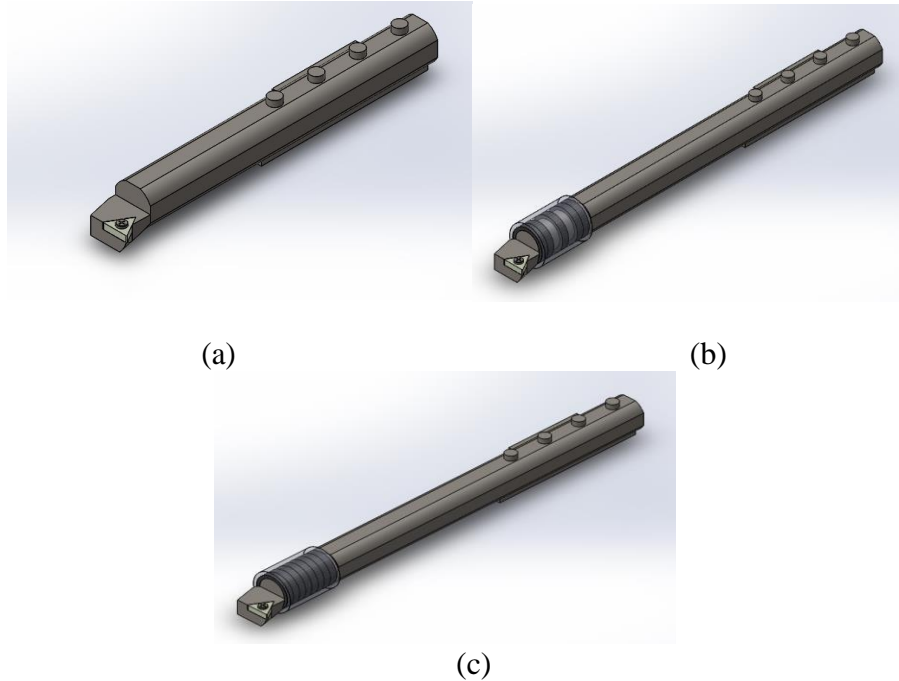
Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), bahwa optimalisasi berasal dari kata optimal yang berarti terbaik, tertinggi, atau paling menguntungkan. Mengoptimalkan berarti menjadikan paling baik, paling tinggi, atau paling menguntungkan. Sedangkan optimalisasi yaitu suatu tindakan untuk mengoptimalkan sesuatu, dengan kata lain proses menjadikan sesuatu menjadi paling baik, paling tinggi, atau paling menguntungkan. Jadi, optimalisasi adalah suatu proses, tindakan, atau metodologi untuk mengoptimalkan sesuatu atau proses menjadikan sesuatu menjadi paling baik. Menurut Winardi (Ali, 1991) optimalisasi adalah usaha menyebabkan tercapainya tujuan jika dipandang dari sudut usaha. Optimalisasi adalah usaha memaksimalkan kegiatan sehingga mewujudkan keuntungan yang diinginkan atau dikehendaki.

Berdasarkan pengertian konsep dan teori diatas, maka dapat disimpulkan korelasi dengan penelitian ini bahwa optimalisasi adalah suatu proses melakukan penelitian yang telah dirancang dengan terencana guna mencapai tujuan yang diharapkan sehingga dapat meningkatkan kinerja secara optimal.

2.2 Tinjauan Pustaka

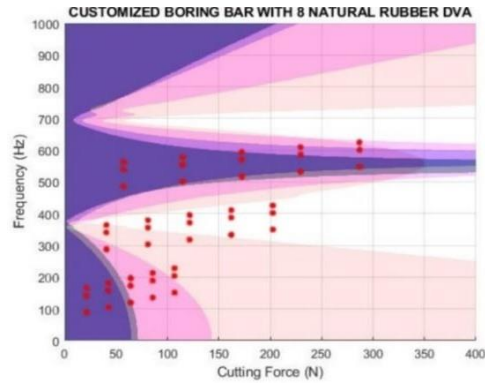
Beberapa penelitian serupa yang pernah dilakukan sebelumnya juga dijadikan sebagai referensi bagi pelaksanaan penelitian ini, seperti halnya pada tahun 2020, telah dilakukan penelitian guna menunjang pengerjaan tugas akhir oleh (Merdekawan, 2020) mengenai *Dynamic Vibration Absorber (DVA)* yang diaplikasikan pada *boring bar* dalam mesin bubut

dengan judul *Pemodelan dan Analisis Respon Getaran Boring Bar pada Internal Turning akibat Pengaruh Variasi Jumlah dan Jenis Karet DVA pada Gaya Pemotongan Tipikal Finishing*. Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan *software ANSYS* dengan beberapa pemodelan dari berbagai variasi seperti berikut.



Gambar 2. 11 *Variation Models of Boring Bar with (a) Regular Boring Bar L/D 4, (b) Customized Boring Bar L/D 8 with 5 Natural Rubber DVA, and (c) Customized Boring Bar L/D 8 with 8 Natural Rubber DVA (Merdekawan, 2020)*

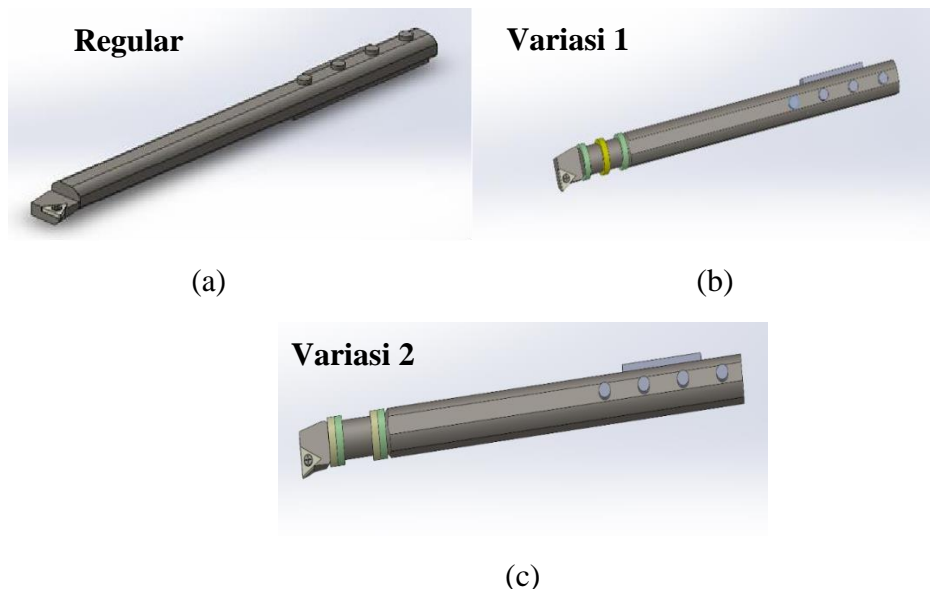
Dari permodelan tersebut dapat dilihat DVA diaplikasikan pada bagian tepi pada *overhang boring bar*, dengan cara memotong sedikit diameter pada bagian *overhang boring bar*. Pada pengujian ini diberikan variasi kekakuan pada *absorber* dengan memvariasikan jumlah dan jenis *absorber*. Variasi jumlah *absorber* yaitu 2,3,4,5,6,7, dan 8 dengan variasi jenis *absorber* berupa *neoprene rubber* dan *natural rubber*. Pengambilan data dilakukan dengan simulasi menggunakan *software ANSYS workbench modal* dan *harmonic response analysis* dengan memberikan *input engineering data* dan *geometry*, diuji dengan *output deformation frequency response* pada tepi *insert* arah sumbu-x, sumbu-y, sumbu-z, dan *frequency response* pada *body mass ring* arah sumbu-y.



Gambar 2. 12 *Cutting Parameters on Stable Zone Customized Boring Bar Design with 8 Natural Rubber* (Merdekawan, 2020)

Dari simulasi yang sudah dilakukan, didapatkan kesimpulan kekakuan dari DVA sangat mempengaruhi *dynamic response* dari *boring bar*. Dari kedua jenis karet, semakin banyak jumlah karet yang diaplikasikan maka daerah redaman akan memiliki frekuensi yang lebih besar. Hal tersebut akan menyebabkan respon gerak *boring bar* akan mampu tetap stabil pada gaya yang lebih besar. Variasi yang memiliki desain operasi stabil yang paling luas adalah *customized boring bar* dengan *8 natural rubber DVA*.

Pada tahun 2020, dilakukan penelitian yang juga menunjang pengerjaan tugas akhir mengenai titik optimum DVA pada pengaplikasian DVA di boring bar oleh (Bramantya Adhi Nugraha, 2020) dengan judul *Analisis Nilai Optimum Reduksi Getaran Akibat Variasi Kombinasi Kekakuan DVA pada Boring Bar Terhadap Proses Finishing Mesin Bubut (Lathe Machine)*. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software ANSYS Harmonic Response Analysis dengan permodelan seperti berikut:

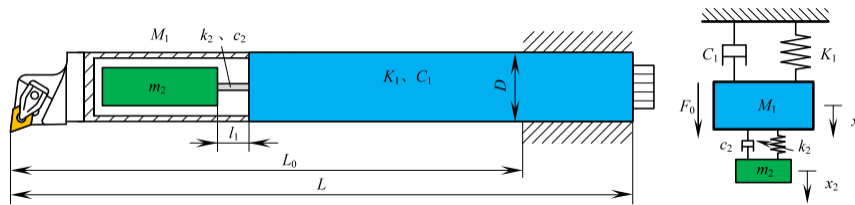


Gambar 2. 13 *Main system with 5 position variations of DVA rubber* (Nugraha, 2020)

Setelah melaksanakan simulasi didapatkan kesimpulan bahwa variasi kombinasi DVA nilai reduksi respon getaran yang paling besar yaitu dengan kombinasi variasi DVA 3 (Kombinasi NA NA). Hasil reduksi respon getaran pada variasi *depth of cut* (doc) dengan menggunakan kombinasi variasi DVA 3 yaitu sebesar 97.99% pada doc 0.4mm, 94.14% pada

doc 0.5mm, 93.59% pada doc 0.6mm, 96.02% pada doc 0.7mm, 96.64% pada doc 0.8mm, 88.41% pada doc 0.9mm, dan 74,32% pada doc 1mm pada sumbu y. Reduksi respon getaran pada sumbu x dan sumbu z mengikuti arah sumbu y dikarenakan gaya terbesar berada pada sumbu y.

Pada penelitian selanjutnya yang dilakukan oleh (Liu et al., 2018) yaitu melakukan penelitian terhadap karakteristik getaran serta variasi kekakuan DVA dengan judul penelitian *Analysis of the Vibration Characteristics and Adjustment Method of Boring Bar with a Variable Stiffness Vibration Absorber (VSDVA)*. Berdasarkan penelitian ini, penambahan DVA pada *boring bar* dilakukan dengan tujuan untuk meneliti pengaruh nilai konstanta kekakuan pada DVA terhadap reduksi getaran sistem utama. *Boring bar* yang digunakan yaitu berbahan material *carbide* dengan nilai $L/D \text{ overhang} = 12$ serta memiliki diameter 40 mm dan panjang *overhang* 600 mm yang terdapat lubang didalamnya sebagai tempat peletakkan DVA. Penggunaan DVA tersebut yaitu berupa balok massa dengan *telescopic adjusting mechanism* yang kemudian divariasikan panjangnya dengan memutar *knob* pada bagian belakang *boring bar* untuk mendapatkan nilai konstanta pegas yang bervariasi. Ilustrasi dan model dinamis ditunjukkan seperti gambar 2.14 berikut ini.

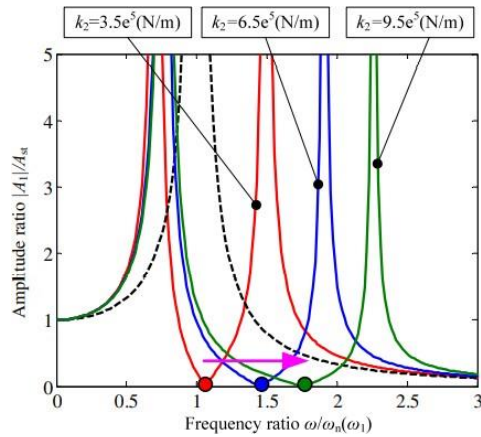


Gambar 2. 14 Boring Bar Illustration and Dynamic Model with VSDVA (Liu et al., 2018)

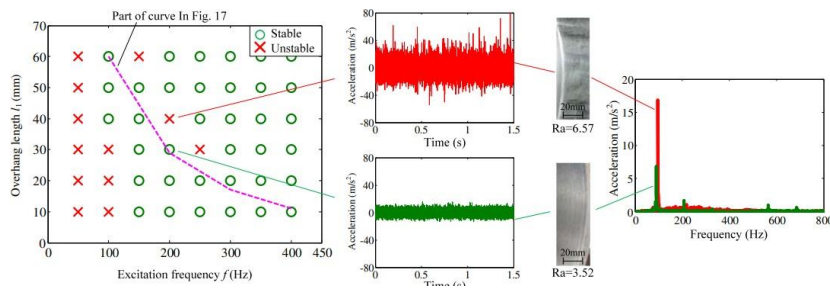
Pada penelitian ini digunakan simulasi guna mengetahui respon getaran *boring bar* yang kemudian divalidasi dengan eksperimen. Nilai parameter penelitian seperti nilai berat massa, nilai konstanta kekakuan, dan konstanta peredam untuk eksperimen didapatkan dari pengukuran dan pengujian langsung terhadap *boring bar* dan VSDVA. Untuk massa DVA dibuat agar sebesar-besarnya dengan menggunakan *high-density cemented carbide* guna memperbesar daerah operasional yang aman, kemudian nilai konstanta pegas DVA yang telah divariasikan dan nilai konstanta redaman DVA diukur diuji dengan cara yang sama seperti sistem utama. Parameter yang digunakan seperti terlihat pada gambar 2.15.

Boring bars	Equivalent mass of boring bar M_1 (kg)	Equivalent mass of VSDVA m_2 (kg)	Equivalent stiffness of boring bar K_1 (10^5 N/m)	Equivalent stiffness of VSDVA k_2 (10^5 N/m)	Damping constant C_1 (N s/m)	Damping constant c_2 (N s/m)
Boring bar with VSDVA	1.48	0.8	5.76	3.5	8.52	5.28
Regular boring bar	2	–	5.95	–	8.52	–

Gambar 2. 15 Boring Bar Parameter and VSDVA (Liu et al., 2018)



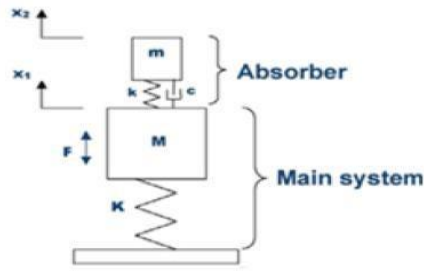
Gambar 2. 16 Simulation Graph of Amplitude Ratio with Frequency Ratio (Liu et al., 2018)



Gambar 2. 17 Stable and unstable diagrams on the results of drilling experiments (Liu et al., 2018)

Berdasarkan hasil simulasi yang didapatkan seperti yang terlihat pada gambar 2.16 dimana grafik berwarna hitam menunjukkan rasio amplitudo *regular boring bar* dengan sistem 1 DOF. Sedangkan grafik yang berwarna merah, biru dan hijau menunjukkan rasio amplitudo *boring bar* dengan penambahan DVA sehingga menjadi sistem 2 DOF. Pada grafik tersebut, terlihat bahwa semakin bertambahnya nilai konstanta kekakuan DVA, maka daerah redaman akan semakin bergeser kekanan. Kemudian dilakukan validasi melalui eksperimen dengan menggunakan mesin CNC lathe CKA6150 untuk melakukan proses pengeboran pada benda kerja C45E4 dengan diameter luar 150 mm, diameter dalam 100 mm, dan panjang 350 mm. Pada gambar 2.17 terlihat bahwa semakin bertambahnya nilai konstanta kekakuan DVA, maka daerah redaman akan semakin bergeser ke kanan. Hal ini menandakan bahwa penting untuk menentukan parameter pemotongan yang mana nantinya akan mempengaruhi frekuensi operasional *boring bar* agar dapat menghindari daerah tak teredam.

Pada jurnal (Pachpute, 2016) yang meneliti tentang optimum desain DVA dengan pendekatan simulasi pada penelitiannya yang berjudul “*Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber – A Simulation Approach*”. Pada penelitiannya, dimodelkan *Damped Dynamic Vibration Absorber (DDVA)* yaitu salah satu perangkat mekanik yang digunakan untuk mereduksi atau mengurangi getaran yang tidak diinginkan. Sistem utama DDVA terdiri dari massa, pegas, dan peredam yang ditempelkan pada sistem utama yang ingin diminimalisir getarannya. Model sistem dinamis dan parameter ditunjukkan pada gambar 2.18.



Gambar 2. 18 Model 2 DOF Damped DVA (Pachpute & Bawa, 2015)

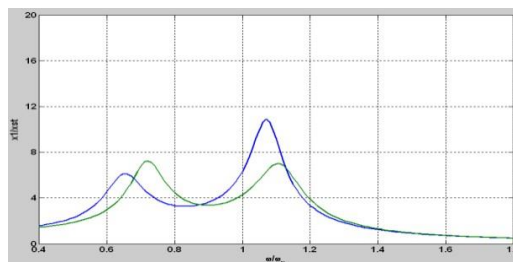
Dari penurunan rumus yang dilakukan, didapatkan bahwa reduksi getaran pada sistem utama dipengaruhi oleh tiga parameter, yaitu *mass ratio* (μ), *damping ratio* (ζ) dan *tuning ratio* (f) atau perbandingan antara ω dan ω_n dengan variasi parameter seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Parameter Variation Table (Pachpute & Bawa, 2015)

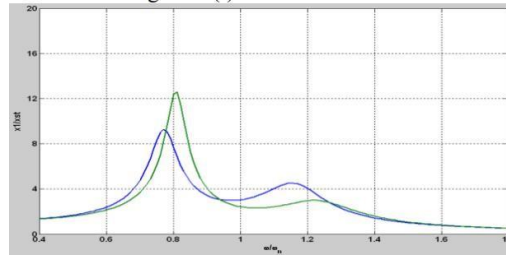
Parameters	Values			
Frequency ratio f	0.7	0.8	0.9	1.0
Mass ratio μ	0.05	0.10	0.15	0.20
Damping ratio ξ	0.0	0.125	0.25	0.5

Tabel 2. 2 Main System Motion Response with Various DVA Parameters (Pachpute & Bawa, 2015)

Sr. No.	μ	f	$\xi=0.0$	$\xi=0.125$	$\xi=0.25$	$\xi=0.5$
	(m/M)	(ω_n/ω_m)	x_1	x_1	x_1	x_1
1	0.05	0.7	28.5	30	30	31.5
2	0.1	0.7	27	27	28	32
3	0.15	0.7	26	28	25	30
4	0.2	0.7	23	21.5	24	30
5	0.05	0.8	39	40	40	45
6	0.1	0.8	32	35	37	45
7	0.15	0.8	27.5	30	33	43
8	0.2	0.8	24	27	30	41
9	0.05	0.9	46	50	67	87
10	0.1	0.9	34	40	52	80
11	0.15	0.9	28	32	43	73
12	0.2	0.9	25	28	33	61
13	0.05	1	45	61	95	160
14	0.1	1	32	38	50	80
15	0.15	1	26	30.5	39.5	53
16	0.2	1	22.5	26	30.5	45



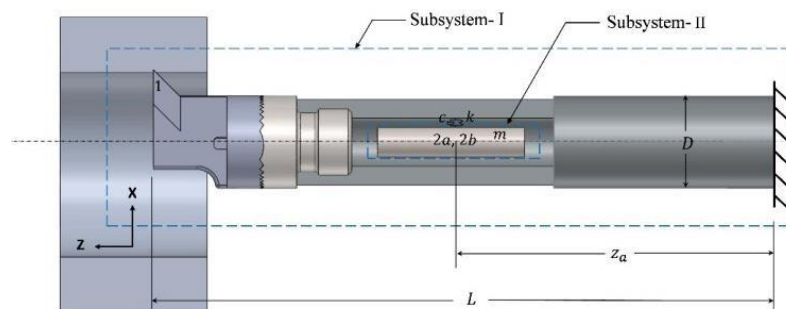
Gambar 2. 19 Main System Response with (μ) = 0.2 and tuning ratio (f) = 0.7 to 0.8



Gambar 2. 20 Main System Response with $\mu = 0.2$, $\xi = 0.125$, $f = 0.9$ to 1.0

Dalam penelitiannya didapatkan respon gerak seperti pada tabel 2.2 dan detail respon grafik pada gambar 2.19 dan 2.20. Dapat disimpulkan bahwa semakin besarnya massa DVA, semakin jauh pula jarak antara *peak* frekuensi natural pertama dengan *peak* frekuensi natural kedua, yang mana berdampak pada semakin luasnya daerah aman sistem untuk beroperasi, namun pada prakteknya jarang dilakukan terutama pada komponen permesinan yang besar. Seperti halnya pada tabel 2.2, dimana seiring bertambahnya rasio massa maka respon gerak sistem akan semakin berkurang namun juga mempersempit jangkauan operasional. Bergantung pada frekuensi operasional, nilai rasio frekuensi akan semakin baik bila nilainya mendekati frekuensi operasional yang diinginkan.

Pada jurnal (Yadav et al., 2020) dilaksanakan penelitian terkait pengoptimasian *tune damper* pada *boring bar* dalam melakukan proses pengeboran dengan judul *Design of Chatter-Resistant Damped Boring Bars Using a Receptance Coupling Approach*. Penelitian ini dilaksanakan atas dasar proses bubut yang dapat dimaksimalkan kedalaman potongnya (*depth of cut*) serta meminimalisir puncak nyata negatif dari *frequency response function* (FRF) karena dengan semakin dalamnya benda kerja yang di pahat, maka menyebabkan nilai kekakuan dari *boring bar* semakin menurun. Hal tersebut akan berdampak pada hasil bubut yang kurang baik dan mengurangi nilai *lifetime* pada peralatan pada proses bubut. Maka dari itu, diperlukan *boring bar* yang didesain dengan cukup panjang namun tetap mempertahankan hasil pengeboran yang baik. Penelitian ini dilakukan dengan memberikan sistem *passive dynamic vibration absorber* (DVA) karena rangkaiannya yang sederhana sehingga lebih banyak ditemui di industri. DVA tersebut diletakkan pada bagian dalam *boring bar* dengan model seperti berikut.

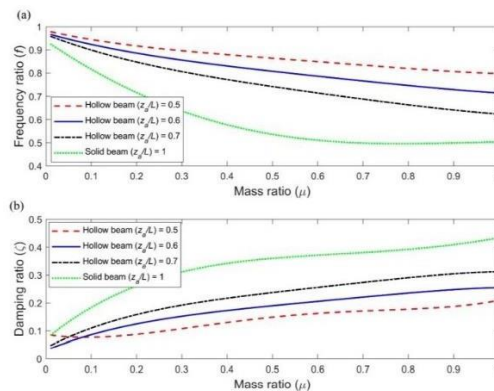


Gambar 2. 21 Tuned Mass Damper Schematic on Boring Bar (Yadav et al., 2020)

Dari pemodelan tersebut dapat dilihat bahwa DVA diaplikasikan pada bagian dalam *boring bar*. Bahan dari *boring bar* tersebut yaitu berupa *steel* dengan densitas 7800 kg/m^3 , modulus 200 GPa , dan memiliki diameter sebesar 25 mm ($L/D = 8$). Rongga tersebut memiliki diameter 16 mm dan panjang 55 mm . Dalam penelitian ini diberikan variasi peletakan DVA dengan jarak $\frac{z_a}{L} \cong 0.5$, $\frac{z_a}{L} \cong 0.6$, dan $\frac{z_a}{L} \cong 0.7$, dimana z_a merupakan jarak DVA dari *fixed end* dan L

merupakan panjang keseluruhan dari *boring bar*. Untuk memaksimalkan *depth of cut*, diasumsikan melakukan pemotongan pada benda kerja berbahan aluminium dengan *cutting insert* yang memiliki *nose radius* sebesar 0.4 mm, sudut tepi potong samping 3° , dan koefisien gaya potong radial diasumsikan sebesar 580 N/mm^2 . Parameter yang ditetapkan tersebut bertujuan untuk mengoptimalkan stabilitas permesinan *boring bar* guna menemukan *stiffness* dan redaman *absorber* yang optimal. Menurut peneliti hal tersebut berkaitan dengan massa modal, kekakuan, dan redaman sistem utama untuk mendapatkan frekuensi dan rasio redaman yang optimal untuk suatu nilai massa absorber.

Kemudian setelah dilakukan simulasi untuk menemukan kekakuan dan redaman yang optimal, maka dihasilkan grafik pengaruh peletakan dari DVA yaitu sebagai berikut.



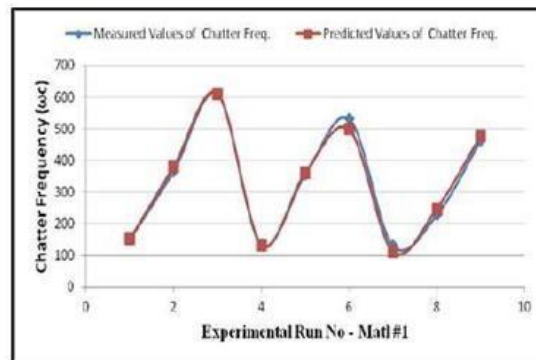
Gambar 2. 22 *The Effect of DVA Position on (a) Optimization of the Frequency Ratio Compared to the Increase in Mass Ratio, and (b) Optimization of the Attenuation Ratio Compared to the Mass Ratio (Yadav et al., 2020)*

Seperti yang terlihat pada gambar 2.22 bahwa pengoptimasian rasio frekuensi dan rasio redaman untuk *absorber* sangat dipengaruhi oleh peletakan DVA. Pada gambar (a) tersebut menunjukkan bahwa DVA yang diletakan lebih jauh dari *free end* memiliki rasio frekuensi paling tinggi seiring dengan bertambahnya rasio massa. Namun berbanding terbalik dengan gambar (b) yang menunjukkan bahwa semakin jauh peletakan DVA terhadap *free end*, semakin rendah peningkatan rasio redamannya seiring dengan bertambahnya rasio massa. Disamping itu, menempatkan DVA dengan jarak yang dekat dengan *free end* sangat tidak direkomendasikan karena *free end* merupakan tempat dari pemotongan berada. Berdasarkan hal tersebut, maka DVA harus dipasang tergantung pada lokasi penempatannya. Melalui pendekatan kopling akan membantu dalam melakukan penentuan peletakan DVA agar boring bar dapat teredam dengan baik.

Penelitian selanjutnya yang menjadi acuan dalam tugas akhir ini adalah penelitian yang dilakukan oleh (Ugochukwu, 2018). Penelitian yang berjudul “*Evaluation of Chatter Vibration Frequency in CNC Turning of 4340 Alloy Steel Material*”. Penelitian ini menunjukkan hasil perbandingan berdasarkan frekuensi chatter yang didapat dari hasil eksperimen dengan hasil perhitungan matematis menggunakan Okokpujie dan Okonkwo equation seperti yang terlihat pada tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Comparison of Experimental Data and Calculation Results.(Ugochukwu et al., 2017)

S/N	Speed (v)	Feed Rate (f)	Depth of Cut (d)	Chatter Freq ω_c (e)	Predicted y values ω_c (m)	Percentage deviation (φ_i)
1	140	0.05	0.1	150.25	151.81	-1.038
2	140	0.10	0.3	366.21	381.36	-4.137
3	140	0.15	0.5	610.94	610.91	0.005
4	230	0.05	0.3	135.33	131.87	2.557
5	230	0.10	0.5	355.56	361.42	-1.648
6	230	0.15	0.1	532.44	497.97	6.474
7	320	0.05	0.5	130.00	111.93	13.900
8	320	0.10	0.1	228.04	248.48	-8.963
9	320	0.15	0.3	463.54	478.03	-3.126



Gambar 2. 23 Comparison Graph of Chatter Frequency Based on Experimental Results and Mathematical Calculation Results.(Ugochukwu et al., 2017)

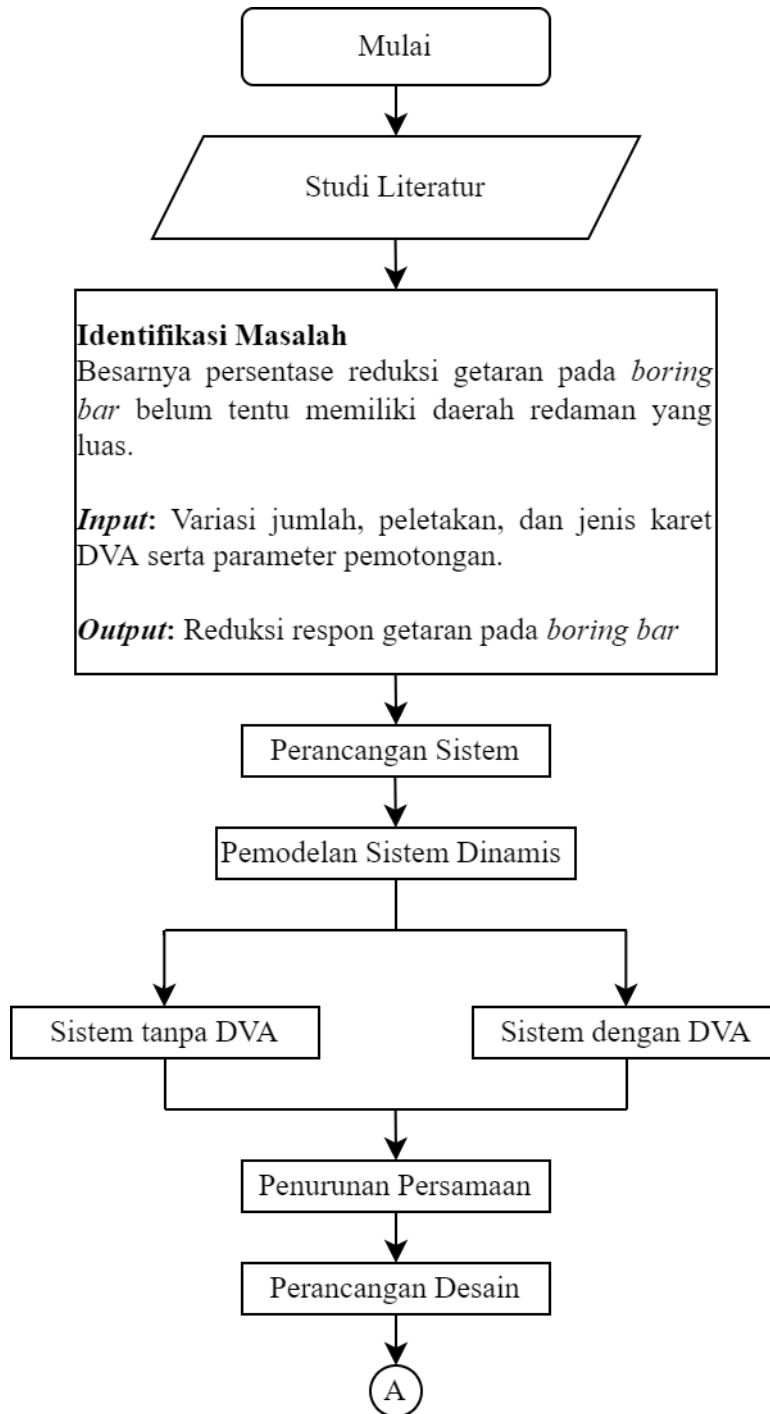
Dari grafik pada gambar 2.23 didapatkan kesimpulan bahwa nilai frekuensi *chatter* dari hasil eksperimen dengan hasil perhitungan matematis hampir mendekati.

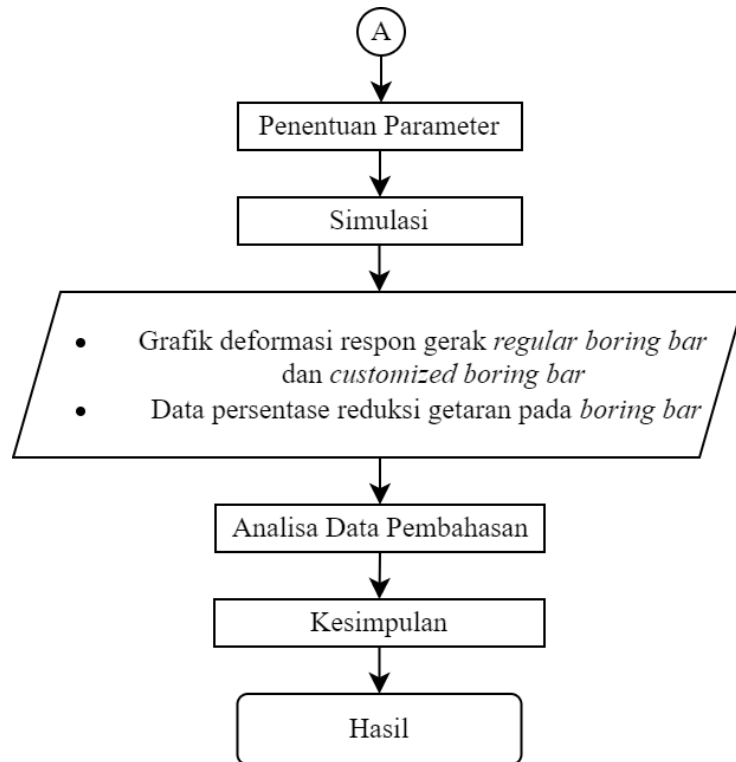
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 *Flowchart* Penelitian

Langkah – langkah yang dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Penjelasan Tahap Penelitian

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahap dan perlu dilakukan pemahaman terhadap metode-metode agar memperoleh hasil yang diinginkan. Metode pengerjaan penelitian tugas akhir telah dijelaskan secara garis besar oleh *flowchart* penelitian pada gambar 3.1. Penjelasan secara rinci mengenai *flowchart* penelitian adalah sebagai berikut.

3.2.1 Studi Literatur

Sebelum penelitian tugas akhir ini dilakukan, maka perlu adanya studi literatur dan mencari referensi yang terkait dengan penelitian ini. Pada tahap ini, pencarian literatur dan referensi yang berkaitan dengan penelitian yaitu antara lain mengenai *dynamic vibration absorber* (DVA), *multi degree of freedom*, dan mesin bubut. Sumber referensi diambil dari beberapa jurnal ilmiah yang berkaitan, *text book*, dan tugas akhir sebelumnya.

3.2.2 Identifikasi Masalah

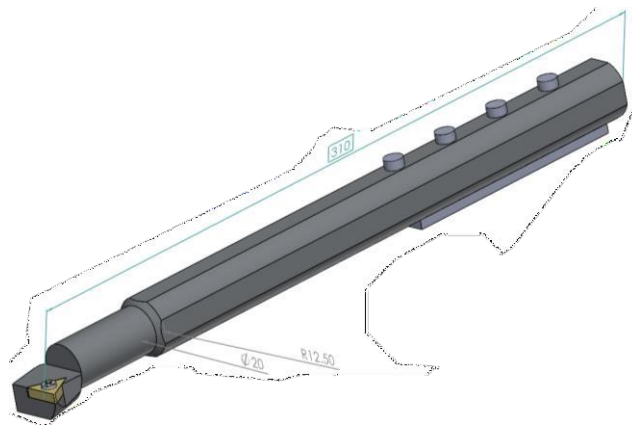
Penelitian ini dilaksanakan untuk menjawab suatu permasalahan, dimana memang butuh rancangan peredam yang optimal guna mereduksi getaran yang terjadi pada proses *boring* sehingga dapat menghasilkan daerah redaman yang luas. Oleh karena itu, guna mendapatkan nilai reduksi getaran pada proses *boring*, maka akan dirancang *boring bar* dengan diberikan sebuah *input* berupa variasi jumlah, peletakan, dan jenis karet DVA serta parameter pemotongan. *Output* yang diharapkan dari pelaksanaan penelitian ini adalah menghasilkan rancangan berupa peredam getaran pada proses *boring* yang dapat memperluas daerah redaman.

3.2.3 Perancangan Sistem

Berikut merupakan penjelasan dari mekanisme sistem utama yaitu *boring bar* dan DVA yang digunakan.

1. Perancangan Sistem Utama (*Boring Bar*)

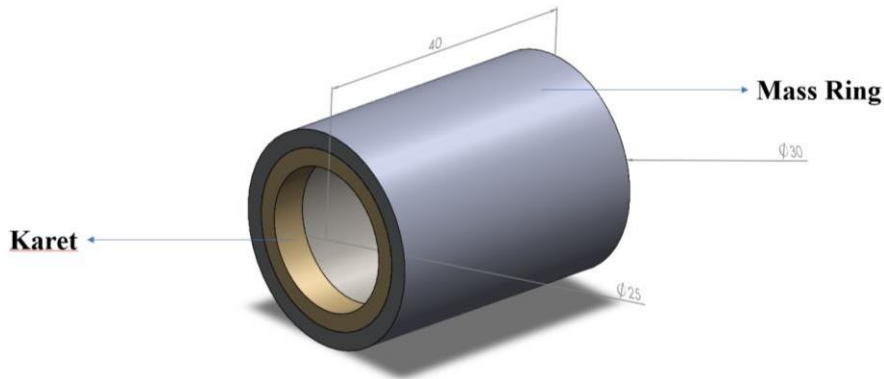
Pada proses pengeboran, terjadi kontak antara pahat dengan benda kerja. Pada penelitian ini, benda kerja yang digunakan memiliki rasio L *overhang* yang relatif pendek dibanding dengan diameter yang dimiliki. Oleh karena itu, benda kerja memiliki kekakuan yang tinggi sehingga getaran pada benda kerja memiliki amplitudo yang sangat kecil. Berbeda dengan pahat yang memiliki L *overhang* lebih panjang dibanding diameter yang dimiliki, sehingga sistem utama yang dianalisis pada penelitian ini adalah pahat atau *boring bar* karena akan menghasilkan amplitudo yang besar. *Tool post* dengan 4 buah bolt sepanjang L/D *clamp* = 4.4 menjepit boring bar dan menerima gaya eksitasi pada bagian depan. Boring bar memiliki L/D *overhang* = 8 dengan diameter pada bagian depan *boring bar* dikurangi diameternya sebagai tempat meletakkan karet DVA seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 *Customized Boring Bar without DVA*

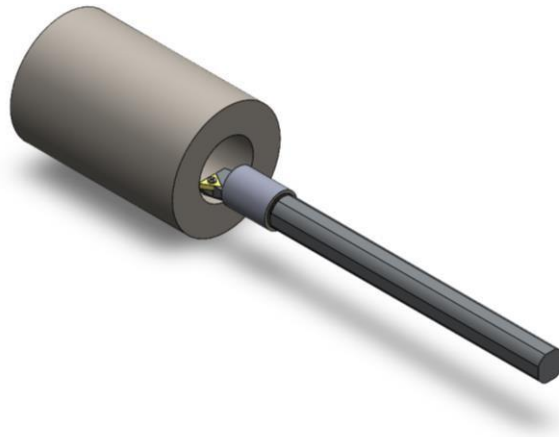
2. Perancangan Mekanisme DVA

Pada penelitian ini dirancang mekanisme DVA untuk meredam getaran berlebih khususnya arah radial pada *boring bar*. DVA yang digunakan terdiri dari *mass ring* dan kekakuan *absorber* berupa *rubber* seperti pada gambar 3.3, dimana *mass ring* terbuat dari metal sedangkan kekakuan *absorber* terbuat dari karet. Arah pergerakan dari DVA jenis ini sama dengan pergerakan terbesar dari sistem utama yaitu arah radial namun berlawanan arah. DVA dipasang pada pengurangan diameter yang dibuat pada bagian depan *boring bar*, dimana *boring bar* akan menerima gaya eksitasi dari gesekan antara pisau pahat pada *boring bar* dengan benda kerja yang berputar, sehingga memberi gaya eksitasi secara kontinyu.



Gambar 3. 3 DVA

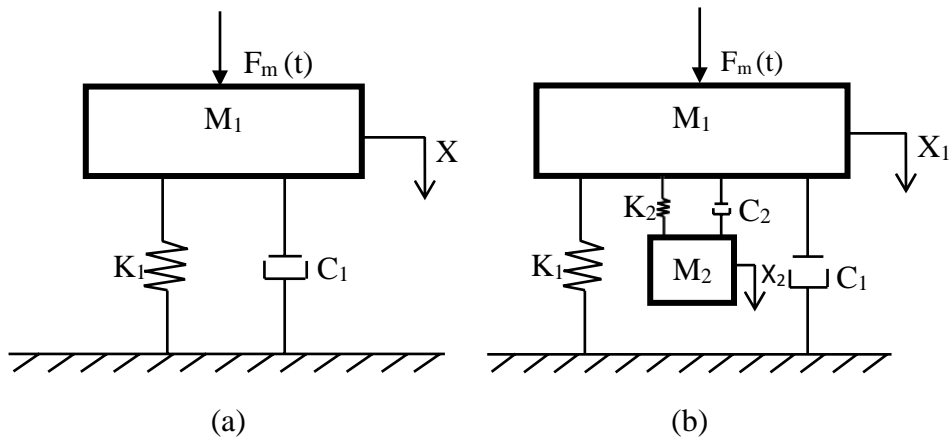
Setelah mengetahui rancangan sistim utama dan DVA, maka dilakukan penggabungan terhadap desain secara keseluruhan dengan pemodelan sebagai berikut.



Gambar 3. 4 Boring Process

3.2.4 Pemodelan Sistem Dinamis

Untuk pemodelan sistem dinamis pada penelitian ini, dilakukan pemodelan sistem dinamis untuk sistem utama tanpa DVA dan sistem utama dengan DVA dengan mengansumsikan konstanta kekakuan dari *boring bar* pada arah *tangential* dan *radial* dianggap sama. Model yang digambarkan memiliki arah sumbu-X yang searah dengan gaya pengeboran (F_m) yang dapat digambarkan seperti berikut:



Gambar 3. 5 Main system dynamic model (a) without DVA (b) with DVA

Keterangan:

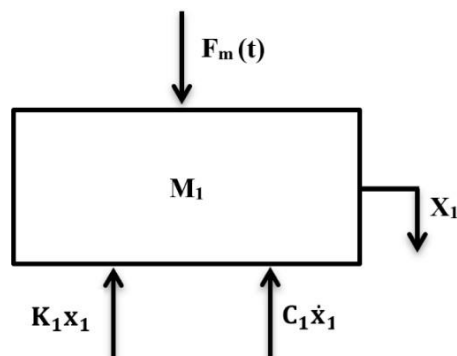
- M_1 : Massa sistem utama
- M_2 : Massa DVA
- K_1 : Konstanta kekakuan sistem utama
- K_2 : Konstanta kekakuan DVA
- C_1 : Konstanta redaman sistem utama
- C_2 : Konstanta redaman DVA
- X_1 : Perpindahan massa sistem utama
- X_2 : Perpindahan massa DVA
- F_m : Gaya eksitasi (*Machining force*) pada sistem utama

3.2.5 Penurunan Persamaan Gerak

Untuk mendesain DVA yang tepat untuk meredam getaran pada *boring bar*, diperlukan analisis persamaan gerak dari sistem utama dengan DVA dan tanpa DVA. Penurunan persamaan gerak dianalisis oleh Nugraha Merdekawan pada penelitian sebelumnya.

1. Sistem utama tanpa DVA

Langkah awal untuk menemukan penurunan persamaan dari sistem utama tanpa DVA dengan menggambarkan dan menganalisis *free body diagram* yang dapat digambarkan seperti dibawah:



Gambar 3. 6 Free Body Diagram of Main System Without DVA

Dari gambar diatas menunjukkan arah gaya yang dapat diturunkan menjadi persamaan gerak translasi pada *boring bar* (m_1):

$$\begin{aligned}
& +\downarrow \sum F = M a \\
& -C\dot{x}_1 - Kx_1 + F_m(t) = M \ddot{x}_1 \\
& M\ddot{x}_1 + C\dot{x}_1 + Kx_1 = F_m(t) \dots\dots\dots(3.1)
\end{aligned}$$

Getaran yang terjadi diakibatkan oleh *radial force* (F_r), *thrust force* (F_t), dan *cutting force* (F_c), gaya eksitasi yang terjadi pada sistem dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\vec{F}_m = \vec{F}_c + \vec{F}_r + \vec{F}_t \dots\dots\dots(3.2)$$

Diasumsikan gaya eksitasi pada sistem:

$$F_m(t) = F_m \sin \omega t \dots\dots\dots(3.3)$$

Dengan substitusi, persamaan gerak menjadi:

$$m|\ddot{x}| + k|\dot{x}| + c|x| = F_m \sin \omega t \dots\dots\dots(3.4)$$

Apabila gaya eksitasi *boring bar* dinyatakan sebagai $F_m e^{i\omega t}$, perpindahan *boring bar* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t}, j = 1, 2 \dots\dots\dots(3.5)$$

Maka persamaan menjadi:

$$m|\ddot{x}| + k|\dot{x}| + c|x| = F_m e^{i\omega t} \dots\dots\dots(3.6)$$

Dimana X_j merupakan amplitudo kompleks dari *boring bar*, maka nilai X_j dapat diturunkan menjadi:

$$\begin{aligned}
x_j &= X_j e^{i\omega t} \\
\dot{x}_j &= i\omega X_j e^{i\omega t} \\
\ddot{x}_j(t) &= -\omega^2 X_j e^{i\omega t} \dots\dots\dots(3.7)
\end{aligned}$$

Persamaan (3.7) disubstitusikan ke persamaan (3.6) akan menghasilkan persamaan:

$$\begin{aligned}
M_1(-\omega^2 X_1 e^{i\omega t}) + C_1(i\omega^2 X_1 e^{i\omega t}) + K_1(X_1 e^{i\omega t}) &= F_m e^{i\omega t} \\
(-M_1\omega^2 + iC_1\omega + K_1)X_1 e^{i\omega t} &= F_m e^{i\omega t} \\
(-M_1\omega^2 + iC_1\omega + K_1)X_1 &= F_m \\
\frac{X_1}{F_m} &= \frac{1}{(-M_1\omega^2 + iC_1\omega + K_1)} \dots\dots\dots(3.8)
\end{aligned}$$

Ruas kiri dan kanan dibagi dengan K_1 dan memisahkan bilangan *real* dan *imaginer* sehingga didapatkan persamaan *steady state* yang dapat dituliskan seperti berikut:

$$\frac{X_1}{F_m} = \frac{1}{\frac{-M_1\omega^2 + iC_1\omega + K_1}{K_1}} \dots\dots\dots(3.9)$$

Dengan:

$$\Omega_n = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}} = \text{Frekuensi natural sistem utama}$$

$$Z = \frac{c_1}{2M_1\Omega_n} = \text{Rasio redaman sistem utama}$$

$$X_{st} = \frac{F_m}{K_1} = \text{Defleksi statis}$$

$$|A + iB| = \sqrt{A^2 + B^2}$$

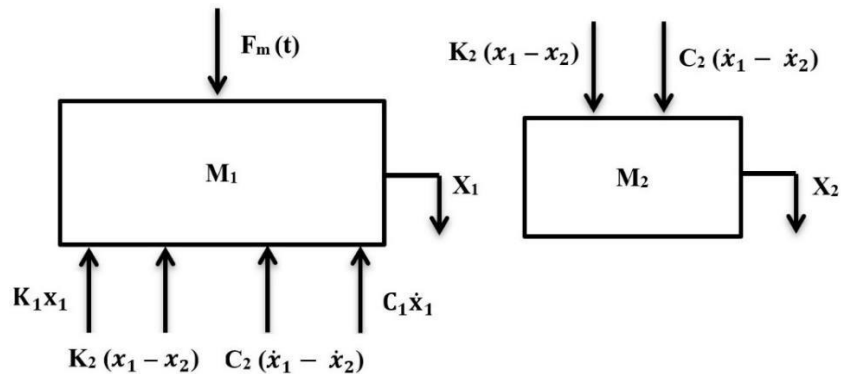
Maka *real steady state* dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{X_1}{X_{st}} = \frac{1}{\sqrt{[\left(\frac{\omega}{\Omega_n}\right)^2 - 1]^2 + 2Z\left(\frac{\omega}{\Omega_n}\right)]^2}} \dots\dots\dots (3.10)$$

(Merdekawan, 2020)

2. Sistem utama dengan DVA

Langkah awal untuk menemukan penurunan persamaan dari sistem utama dengan DVA dengan menggambarkan dan menganalisis *free body diagram* yang dapat digambarkan seperti dibawah:



Gambar 3. 7 Free Body Diagram of Main System With DVA

Dari gambar diatas menunjukkan arah gaya yang dapat diturunkan menjadi persamaan seperti berikut:

$$\begin{aligned}
 &+\downarrow \sum F = M a \\
 &-C_1\dot{x}_1 - C_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - K_1x_1 - K_2(x_1 - x_2) + F_m = M_1 \ddot{x}_1 \\
 &M_1\ddot{x}_1 + C_1\dot{x}_1 + C_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + K_1x_1 + K_2(x_1 - x_2) = F_m \dots\dots\dots (3.11)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+\downarrow \sum F = M a \\
 &M_2\ddot{x}_2 - C_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - K_2(x_1 - x_2) = 0 \dots\dots\dots (3.12)
 \end{aligned}$$

Persamaan (3.12) didistribusikan dengan persamaan (3.5) s.d (3.7) maka didapatkan persamaan seperti dibawah ini:

$$M_2(-\omega^2 X_2 e^{i\omega t}) + C_2(i\omega X_2 e^{i\omega t}) - C_2(i\omega X_1 e^{i\omega t}) + K_2(X_1 e^{i\omega t}) - K_2(X_2 e^{i\omega t}) = 0$$

$$(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2)(X_2e^{i\omega t}) - (C_2i\omega + K_2)(X_1e^{i\omega t}) = 0$$

$$(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2)X_2 = (C_2i\omega + K_2)X_1$$

$$X_2 = \frac{(C_2i\omega + K_2)}{(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2)} X_1 \dots \dots \dots (3.13)$$

Persamaan (3.13) disubstitusikan dengan persamaan (3.11) maka didapat persamaan seperti berikut:

$$[(-M_1\omega^2 + C_1i\omega + C_2i\omega + K_1 + K_2)X_1 - (C_2i\omega + K_2)X_2]e^{i\omega t} K_2(X_2e^{i\omega t}) = F_m e^{i\omega t}$$

$$-M_1\omega^2 + C_1i\omega + C_2i\omega + K_1 + K_2)X_1 - (C_2i\omega + K_2) \left[\frac{(C_2i\omega + K_2)}{(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2)} \right] X_1 = F_m$$

$$\frac{(-M_1\omega^2 + C_1i\omega + C_2i\omega + K_1 + K_2)(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2) - (-C_2^2\omega^2 + 2C_1C_2i\omega + K_1K_2)}{(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2)} X_1 = F_m$$

$$\frac{(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2)}{[M_1M_2\omega^4 - (M_1K_2 + M_2K_1 + M_2K_2 - C_1C_2)\omega^2 + K_1K_2] + i[-(M_1C_2 - M_2C_1 - M_2C_2)\omega^3 + (C_1K_2 + C_2K_1)\omega]} = \frac{X_1}{F_m} \dots \dots \dots (3.14)$$

Dilakukan pembagian K_1 pada persamaan (3.14) dalam kedua ruas, menghasilkan persamaan baru:

$$\frac{(-M_2\omega^2 + C_2i\omega + K_2) \frac{C_2}{K_1}}{[M_1M_2\omega^4 - (M_1K_2 + M_2K_1 + M_2K_2 - C_1C_2)\omega^2 + K_1K_2] + i[-(\frac{M_1C_2}{K_1} + \frac{M_2C_1}{K_1} + \frac{M_2C_2}{K_1})\omega^3 + (\frac{C_1K_2}{K_1} + \frac{C_2K_1}{K_1})\omega]} = \frac{X_1}{F_m} \dots \dots \dots (3.15)$$

Lalu dilakukan pembagian $\frac{K_2}{K_2}$ pada ruas kiri dari persamaan (3.15) sehingga menjadi:

$$\frac{(1 - \frac{M_2\omega^2}{K_2} + \frac{C_2i\omega}{K_2})}{[M_1M_2\omega^4 - (M_1 + \frac{M_2}{K_2} - \frac{M_2}{K_2} - \frac{C_1C_2}{K_2})\omega^2 + 1] + i[-(\frac{M_1K_2}{K_1K_2} + \frac{M_2C_1}{K_1K_2} + \frac{M_2C_2}{K_1K_2})\omega^3 + (\frac{C_1K_2 + C_2K_1}{K_1K_2})\omega]} = \frac{X_1}{F_m} \dots \dots \dots (3.16)$$

Dengan:

$$\Omega_1 = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}} = \text{Frekuensi natural sistem massa 1}$$

$$\Omega_2 = \sqrt{\frac{K_2}{M_2}} = \text{Frekuensi natural sistem massa 2}$$

$$\mu = \frac{M_2}{M_1} = \text{Rasio massa 2 dan massa 1}$$

$$Z = \frac{M_1C_1}{2M_1\Omega_n} = \text{Rasio redaman sistem massa 1}$$

$$\zeta = \frac{C_2}{2M_2\omega_n} = \text{Rasio redaman sistem massa 2}$$

Maka disubstitusikan menjadi 4 persamaan:

$$\begin{aligned}
 A &= 1 - \left(\frac{M_2}{K_2}\right) \omega^2 \\
 &= 1 - \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\Omega_1}\right)^2 \\
 B &= \left(\frac{C_2}{K_2}\right) \omega \\
 &= 2\zeta \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right) \left(\frac{\omega}{\Omega_1}\right) \\
 C &= \left(\frac{M_1 M_2}{K_1 K_2}\right) \omega^4 - \left(\frac{M_1}{K_1} + \frac{M_2}{K_2} + \frac{M_2}{K_1} - \frac{C_1 C_2}{K_1 K_2}\right) \omega^2 + 1 \\
 &= \left(\frac{1}{\Omega_1 \Omega_2}\right)^2 \omega^4 - \left(\frac{1}{\Omega_1^2} + \frac{1}{\Omega_2^2} + \frac{\mu}{\Omega_1} + \frac{2Z M_1 \Omega_1 2\zeta M_2 \Omega_2}{K_1 K_2}\right) \omega^2 + 1 \\
 &= \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2 \left(\frac{\omega}{\Omega_1}\right)^4 - \left(1 + \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2 + \mu + 4Z\zeta \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right)^2\right) \left(\frac{\omega}{\Omega_1}\right)^2 + 1 \\
 D &= -\left(\frac{M_1 C_2}{K_1 K_2} + \frac{M_2 C_1}{K_1 K_2} + \frac{M_2 C_2}{K_1 K_2}\right) \omega^3 + \left(\frac{C_1 K_2 + C_2 K_1}{K_1 K_2}\right) \omega \\
 &= -\left[\left(\frac{M_1}{K_1} + \frac{M_2 C_1}{K_1 K_2} + \frac{M_2}{K_1}\right) \omega^2 + \left(\frac{C_1 C_2}{K_1 K_2} + 1\right)\right] \left(\frac{C_2}{K_2}\right) \omega \\
 &= -\left[\left(\frac{1}{\Omega_1} + \frac{Z}{\zeta \Omega_1 \Omega_2} + \frac{\mu_2}{\Omega_1}\right) \omega^2 + \left(\frac{Z \Omega_2}{\zeta \Omega_1} + 1\right)\right] \left(\frac{C_2}{K_2}\right) \omega \\
 &= -\left(1 + \frac{Z}{\zeta} \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right) + \mu\right) \left(\frac{\omega}{\Omega_1}\right)^2 \left(\frac{Z}{\zeta} \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right) + 1\right) 2\zeta \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2}\right) \left(\frac{\omega}{\Omega_1}\right)
 \end{aligned}$$

Maka didapat persamaan *steady state real* dapat dirumuskan seperti berikut:

$$\frac{X_1}{X_{st}} = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{C^2 + D^2}} \quad (3.17)$$

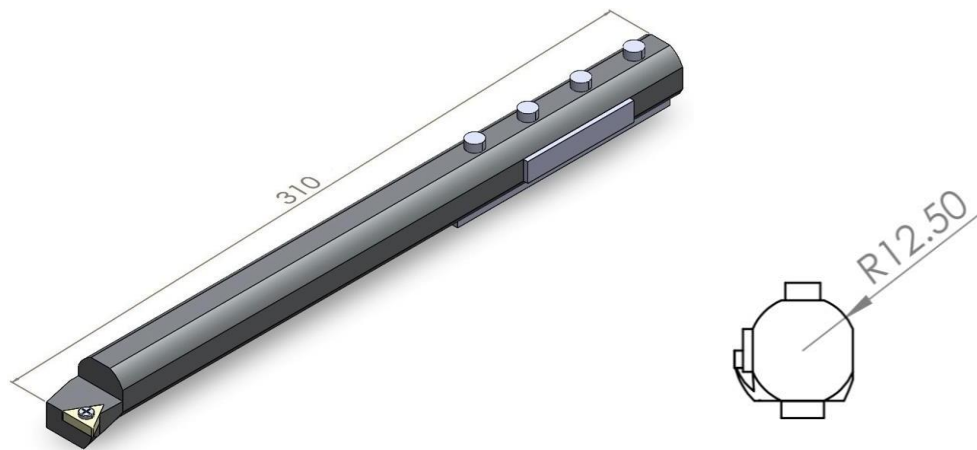
3.2.6 Perancangan Desain

Pada subbab ini akan dibahas mengenai komponen-komponen penyusun dari sistem massa utama dan DVA yang telah dirancang sebagai berikut:

1. Sistem Utama

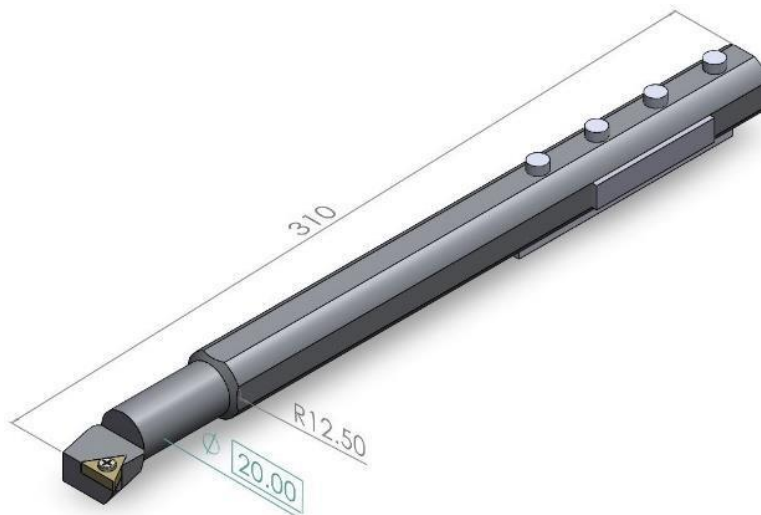
Sistem utama yang dianalisis pada penelitian ini adalah *boring bar* yang mana terdiri dari beberapa komponen dengan material yang berbeda-beda.

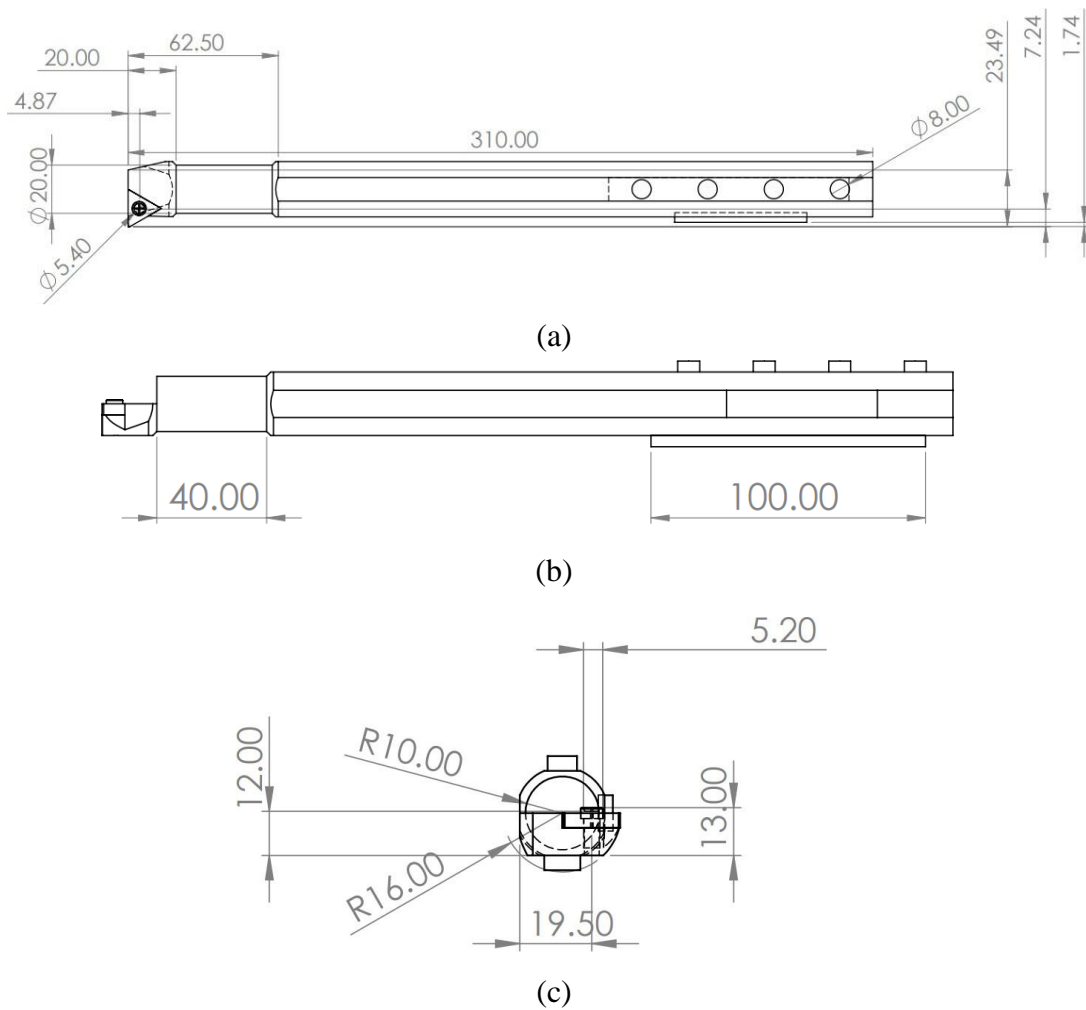
Body, pada bagian ini merupakan bagian utama yang menjadi permasalahan dalam penelitian ini. Dalam mengoptimasi daerah redaman yang luas, maka material yang digunakan pada *body boring bar* yaitu carbon steel jenis AISI 4140, menyesuaikan dengan penelitian sebelumnya. Berikut merupakan *regular body boring bar* dengan rasio *L/D overhang* = 8.



Gambar 3. 8 *Dimension of Regular Boring Bar*

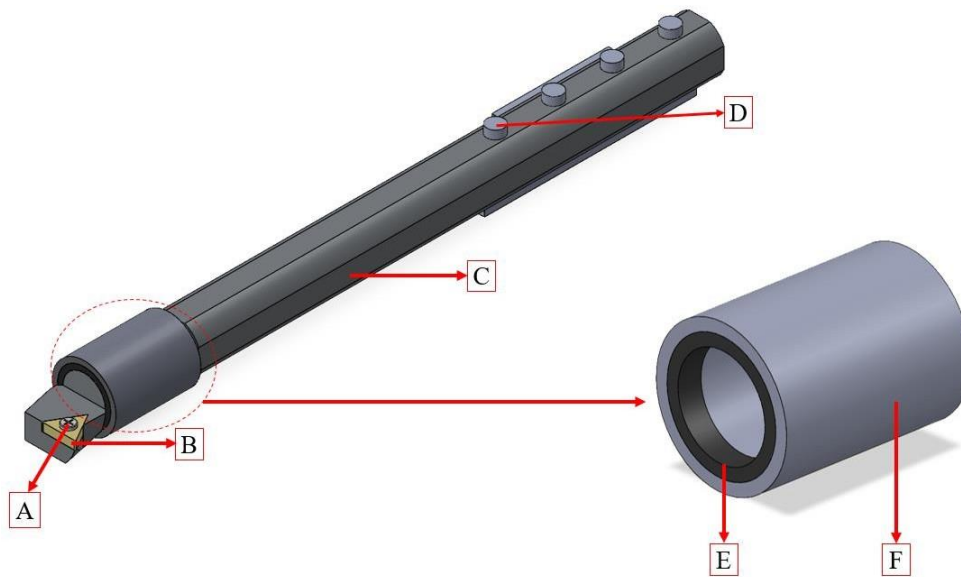
Pada gambar 3.8 merupakan rancangan dari *regular boring bar*. Dapat dilihat bahwa diameter dari *body boring bar* yaitu 25 mm dan panjang yaitu 310 mm dimana 110 mm bagian *body boring bar* akan di cekam oleh *clamp*. Kemudian pada rancangan berikutnya merupakan desain dari *customized boring bar* ditunjukkan gambar 3.9 bahwa bagian depan *boring bar* diberi sedikit modifikasi yaitu berupa pengurangan diameter guna sebagai peletakan karet DVA dengan tidak mengurangi kekakuan *boring bar* terlalu signifikan. Guna mendapatkan jarak rentang reduksi getaran yang besar, maka dibutuhkan massa DVA yang besar. Pada rancangan desain ini, diameter dikurangi menjadi 20 mm dengan panjang 40 mm seperti pada gambar 3.9 diatas.





Gambar 3.9 Engineering Drawing (a) Top View, (b) Side View, and (c) Front View of Customized Boring Bar

Gambar 3.9 diatas merupakan rancangan penampang *customized boring bar* tanpa *dynamic vibration absorber* atau DVA. Pada gambar berikut ini merupakan ilustrasi dari *customized boring bar* dengan penambahan karet dan *mass ring* sebagai DVA yang terpasang pada bagian pengurangan diameter. Komponen penyusun *boring bar* yaitu terdiri dari beberapa material yang akan dijelaskan pada gambar 3.10 berikut ini.



Gambar 3. 10 *Specification of Customized Boring Bar*

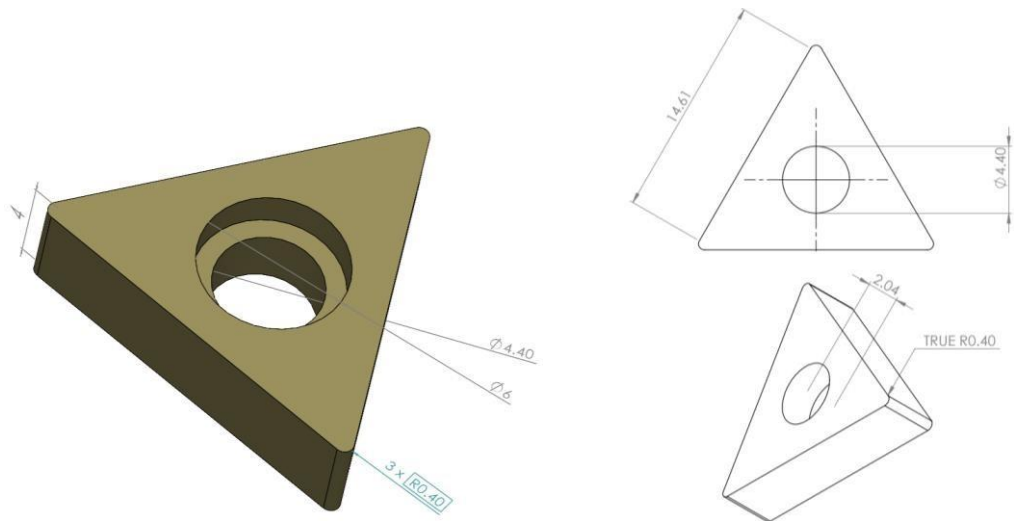
Tabel 3. 1 *Specification Material Properties of Customized Boring Bar*

	<i>Mechanical Properties</i>
A	<i>Bolt</i>
B	<i>Insert</i>
C	<i>Body Boring Bar</i>
D	<i>Tool Holder</i>
E	<i>Rubber</i>
F	<i>Mass Ring</i>

Tabel 3.1 merupakan spesifikasi *properties* dari *customized boring bar* dimana *boring bar* terdiri dari berbagai macam *properties*.

2. *Insert*

Insert, bagian ini merupakan pisau pahat yang mana digunakan sebagai pemotong benda kerja. Dikarenakan benda kerja yang digunakan adalah AISI 4340 yang mana merupakan material yang tergolong keras, maka material pahat yang digunakan adalah carbide dengan model TCMT 16. Pada bagian tengah *insert* terdapat lubang sebagai *fitting insert* dengan bagian *head*. Memiliki tebal 4 mm dan *nose radius* sebesar 0,4 mm sebagaimana tertera pada gambar 3.11 berikut.

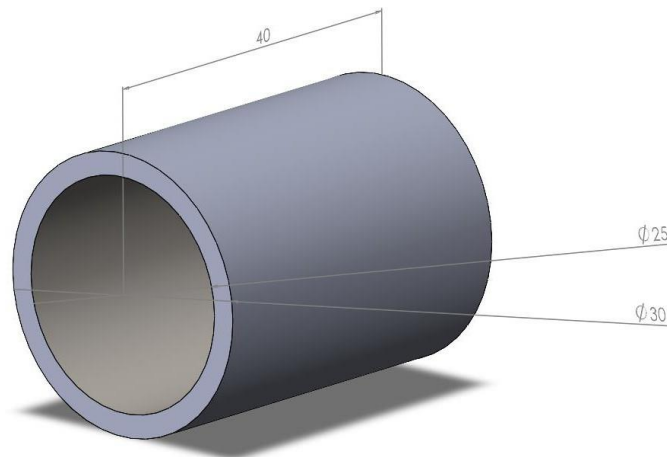


Gambar 3. 11 Carbide Insert

3. DVA

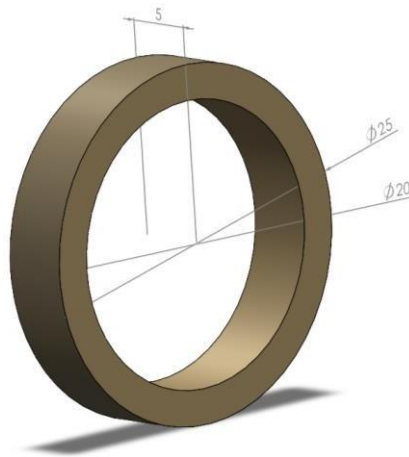
Pada penelitian ini digunakan *dynamic vibration absorber* sebagai media peredam getaran berlebihan yang terjadi. Telah dirancang *dynamic vibration absorber* yang mana terdiri dari *mass ring* dan *rubber*.

Mass ring, bagian ini idealnya dibuat dengan *material high-density cemented carbide* agar mendapatkan massa *absorber* yang besar guna memperoleh daerah operasional aman yang lebih luas. Namun pada penelitian ini digunakan *brass* dikarenakan memiliki massa jenis yang sedikit lebih berat dibanding tipikal *carbon steel* biasa serta mudah untuk di-*machining* dan harganya yang murah. Memiliki massa jenis $8,73 \text{ g/cm}^3$, dengan diameter luar 30 mm dan diameter dalam 25 mm dengan panjang 40 mm sebagaimana tertera pada gambar 3.12 berikut.



Gambar 3. 12 Mass Ring

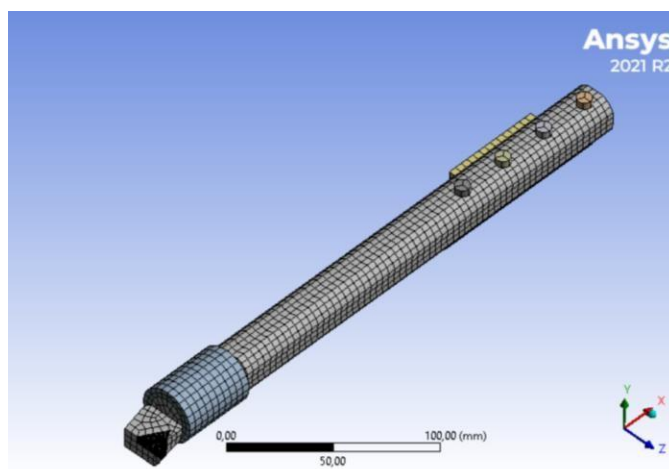
Pada bagian karet, material yang dipilih pada penelitian ini adalah *neoprene rubber* dan *natural rubber*. Masing-masing pada jenis karet memiliki massa jenis yang berbeda yaitu sebesar $0,92 \text{ g/cm}^3$ pada *natural rubber* dengan modulus elastisitas sebesar 1,5 MPa dan $1,23 \text{ g/cm}^3$ pada *neoprene rubber* dengan modulus elastisitas sebesar 6,14 MPa. Dilakukan variasi jumlah dan jenis karet dengan berbagai kombinasi peletakan dimana memiliki ukuran diameter luar sama dengan *body boring bar* yakni 25 mm dan diameter dalam 20 mm.



Gambar 3. 13 DVA Rubber

3.2.7 Meshing

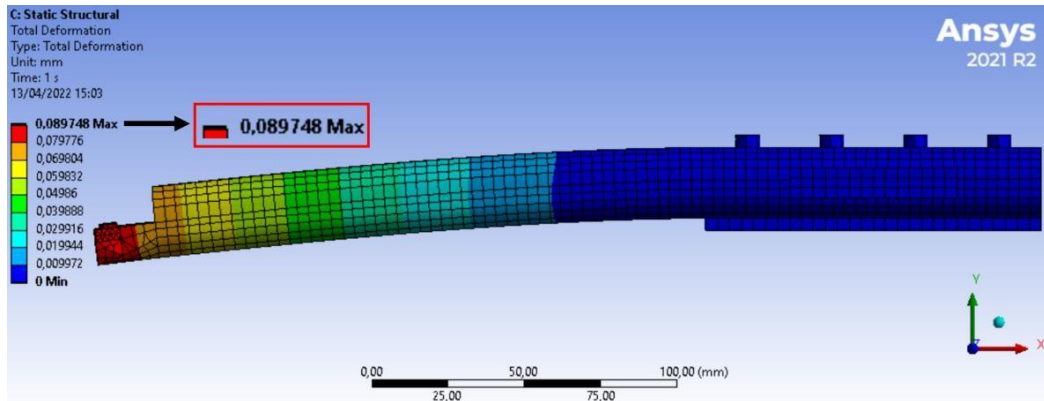
Meshing adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit. Pada geometri penelitian ini, digunakan dua metode *meshing* yakni *body sizing* dan *multizone*. *Body sizing* pada *meshing* berguna untuk analisis geometri yang kompleks dan mengatur tingkat kehalusan dari hasil *meshing*. Sedangkan *multizone* berguna untuk mendekomposisikan geometri secara otomatis. Kualitas hasil *meshing* nantinya akan dibandingkan dengan parameter *orthogonal quality*. Untuk detail daripada *sizing* akan dijelaskan pada subbab 3.2.9.



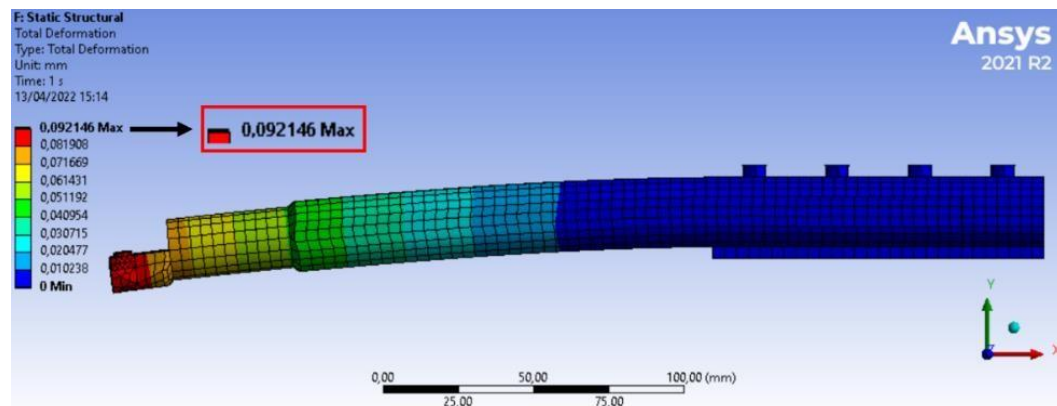
Gambar 3. 14 Mesh

3.2.8 Penentuan Parameter

Pada penelitian ini digunakan 27 dari 45 parameter yang paling optimal dari penelitian sebelumnya dengan mengoptimasikan DVA agar menghasilkan reduksi getaran serta memiliki daerah redaman yang luas melalui variasi kombinasi karet. Parameter yang dibutuhkan dari mesin bubut yaitu *cutting parameter*. Parameter dari sistem utama yaitu konstanta massa sistem utama, konstanta kekakuan dari sistem utama, dan konstanta redaman dari sistem utama. Lalu untuk DVA membutuhkan parameter berupa konstanta massa DVA, konstanta kekakuan DVA, dan konstanta redaman DVA. Sebelum menentukan parameter-parameter tersebut, maka dilakukan sebuah simulasi deformasi statis dari *regular boring bar* dan *customized boring bar* dimana simulasi tersebut bertujuan untuk melihat seberapa besar kekakuan pada boring bar berkurang setelah terjadi *customized*.



(a)



(b)

Gambar 3.15 (a) *Simulation of static deformation of regular boring bar* and (b) *Simulation of static deformation of customized boring bar*

Gambar 3.15 merupakan hasil simulasi deformasi statis dari *regular boring bar* dan *customized boring bar*. Pengurangan diameter dibuat tidak dengan profil tegak lurus melainkan diberi sudut 45° guna menghindari gesekan antara karet dengan body boring bar. Gesekan antar karet dengan *body boring bar* menyebabkan konstanta redaman DVA menjadi semakin besar yang mana hal tersebut tidak diinginkan karena dapat mengurangi efek redaman dari DVA. Pada simulasi *Software Ansys* diatas, diberikan *fixed support* pada bagian belakang *boring bar* dan gaya pada ujung *insert* dengan nilai sebesar 68,39 N arah sumbu x, -99,12 N arah sumbu y, dan -37,66 arah sumbu z dengan resultan gaya 126,18 N, dimana nilai ini diambil dari rata-rata gaya eksitasi pada pengeboran tipikal *finishing*. Ditunjukkan pada gambar 3.15 (a) bahwa deformasi total pada *regular boring bar* memiliki nilai 0,089748 mm dan gambar 3.15 (b) yang menunjukkan bahwa deformasi total pada *customized boring bar* sebesar 0,092146 mm. Sehubungan dengan didapatkannya nilai deformasi tersebut, maka didapatkan pula nilai kekakuan pada masing-masing boring bar dengan menggunakan persamaan 3.18 seperti berikut.

$$F = K \Delta x \dots\dots\dots(3.18)$$

Nilai gaya (N) yang digunakan adalah nilai resultan gaya 126,18 N dan nilai deformasi (mm) yang digunakan adalah nilai yang terlampir pada gambar 3.15 (a) dan 3.15 (b). Maka dari itu, didapatkan nilai kekakuan pada masing-masing *boring bar* adalah sebesar 1406 N/mm pada

regular boring bar dan 1370 N/mm. Oleh karena itu, didapatkan pengurangan kekakuan dari boring bar sebagai sistem utama adalah 2,6%.

1. Cutting Parameter

Pada proses permesinan ini dibutuhkan *cutting parameter* sesuai berdasarkan kebutuhan. *Cutting parameter* meliputi putaran spindle (N), kecepatan potong (V), *depth of cut* (d), *feeding rate* (f), frekuensi operasional (ω_c), diameter, dan material benda kerja. Parameter yang digunakan dalam penelitian ini mempertimbangkan diameter dalam (D_i) benda kerja yang akan dipotong yaitu 40 mm dengan kemampuan putaran *spindle* yang ada pada mesin bubut yang ada di *workshop*, digunakan putaran spindle (N) pada putaran high yaitu 920 rpm, 1250 rpm, dan 2000 rpm guna mendapatkan nilai *cuttingspeed* (V) yang besar. *Cuttingspeed* kemudian diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$V = \pi D N \dots\dots\dots(3.19)$$

- Variasi putaran *spindle* 1:
 $V = \pi D N$
 $V_1 = \pi 0,04 \text{ m } 920 \text{ rpm}$
 $V_1 = 115,5 \text{ m/min}$
- Variasi putaran *spindle* 2:
 $V = \pi D N$
 $V_1 = \pi 0,04 \text{ m } 1250 \text{ rpm}$
 $V_1 = 157 \text{ m/min}$
- Variasi putaran *spindle* 3:
 $V = \pi D N$
 $V_1 = \pi 0,04 \text{ m } 2000 \text{ rpm}$
 $V_1 = 251,2 \text{ m/min}$

Kemudian dibutuhkan parameter *feedrate* (f) yang mana nilai $K_c(f)$ didapat dari technical data ISO 13399 standard yakni pada $f_1 = 0,05 \text{ mm/rev}$, $K_{c1} = 4275 \text{ MPa}$, pada $f_2 = 0,1 \text{ mm/rev}$, $K_{c2} = 4050 \text{ Mpa}$, dan pada $f_3 = 0,15 \text{ mm/rev}$, $K_{c3} = 3825 \text{ MPa}$. Nilai *feedrate* akan mempengaruhi gaya pada permesinan (F_m), meningkatnya frekuensi *chatter* (ω_c) secara signifikan, dan *specific cutting force* (K_c). Kemudian ditentukan nilai *depth of cut* (d) pada penelitian ini yakni 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm, 0,4 mm, dan 0,5 mm. Semakin besar nilai *depth of cut* maka akan mempengaruhi besarnya gaya pada permesinan dan meningkatnya frekuensi *chatter*. Frekuensi *chatter* didapatkan dengan memasukkan parameter (V), (f), dan (d) diatas pada persamaan yang didapatkan dari eksperimen yang dilakukan oleh.(Ugochukwu et al., 2017), sebagaimana pada persamaan 3.20 berikut.

$$\omega_c = 17.0 - 0.566 V + 3971 f + 155 d \dots\dots\dots(3.20)$$

Dimana:

$$V = \text{Cuttingspeed (m/min)}$$

$$F = \text{Feedrate (mm/rev)}$$

$$d = \text{Depth of cut (mm)}$$

$$\omega_c = \text{Chatter frequency (Hz)}$$

Gaya yang dianalisis merupakan gaya pada proses permesinan (F_m) yaitu terdiri atas *cutting force* (F_c), *radial force* (F_r), dan *thrust force* (F_t). Nilai F_c tersebut didapatkan melalui rumus sebagai berikut.

$$F_c = K_c d f \dots\dots\dots(3.21)$$

Cutting force (F_c) didapat dari perkalian antara *specific cutting force* (K_c) dengan *feed rate* (f) dan *depth of cut* (d), yang mana nilai K_c (f) didapat dari *technical data* ISO 13399 standard yaitu pada $f_1 = 0,1$ mm/rev, $K_{c1} = 4050$ Mpa. Sedangkan *radial force* dan *thrust force* didapat dari hasil pendekatan dengan mengalikan *cutting force* dengan *correction factor* yang didapat dari data penelitian terdahulu seperti berikut.

- $F_r = 0,69 F_c$
- $F_t = 0,38 F_c$

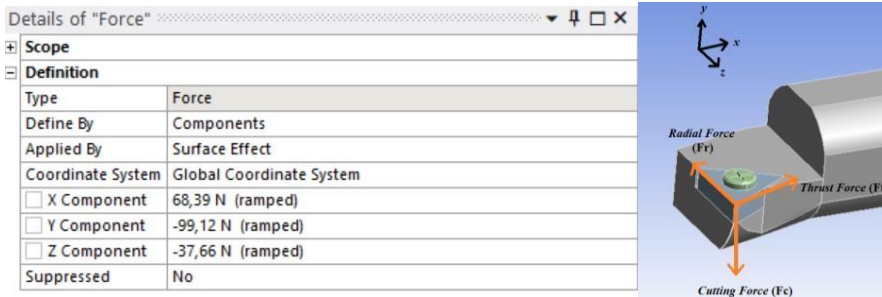
Berikut merupakan tabel parameter pemotongan yang digunakan pada penelitian ini:

Tabel 3. 2 Cutting Parameter

No	Dimension		Cutting Parameter					
	D (m)	L (m)	MRR (cm ² /min)	N (rpm)	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)	Kc (Mpa)
1	0,04	0,15	0,6	920	115,5	0,05	0,1	4275
2	0,04	0,15	1,2	920	115,5	0,05	0,2	4275
3	0,04	0,15	0,8	1250	157	0,05	0,1	4275
4	0,04	0,15	1,6	1250	157	0,05	0,2	4275
5	0,04	0,15	1,3	2000	251,2	0,05	0,1	4275
6	0,04	0,15	2,5	2000	251,2	0,05	0,2	4275
7	0,04	0,15	1,2	920	115,5	0,1	0,1	4275
8	0,04	0,15	2,3	920	115,5	0,1	0,2	4275
9	0,04	0,15	3,5	920	115,5	0,1	0,3	4050
10	0,04	0,15	4,6	920	115,5	0,1	0,4	4050
11	0,04	0,15	5,8	920	115,5	0,1	0,5	4050
12	0,04	0,15	1,6	1250	157	0,1	0,1	4050
13	0,04	0,15	3,1	1250	157	0,1	0,2	4050
14	0,04	0,15	6,3	1250	157	0,1	0,4	4050
15	0,04	0,15	7,9	1250	157	0,1	0,5	4050
16	0,04	0,15	2,5	2000	251,2	0,1	0,1	4050
17	0,04	0,15	5,0	2000	251,2	0,1	0,2	4050
18	0,04	0,15	7,5	2000	251,2	0,1	0,3	4050
19	0,04	0,15	1,7	920	115,5	0,15	0,1	3825
20	0,04	0,15	3,5	920	115,5	0,15	0,2	3825
21	0,04	0,15	2,4	1250	157	0,15	0,1	3825
22	0,04	0,15	4,7	1250	157	0,15	0,2	3825
23	0,04	0,15	7,1	1250	157	0,15	0,3	3825
24	0,04	0,15	3,8	2000	251,2	0,15	0,1	3825
25	0,04	0,15	7,5	2000	251,2	0,15	0,2	3825
26	0,04	0,15	11,3	2000	251,2	0,15	0,3	3825
27	0,04	0,15	18,8	2000	251,2	0,15	0,5	3825

Selain *cutting parameter* tersebut, gaya eksitasi juga perlu dianalisis yang didapatkan dari resultan gaya pada proses permesinan, yakni terdiri dari *cutting force* (F_c), *radial force* (F_r), dan *thrust force* (F_t). Pada simulasi dengan menggunakan *Workbench Ansys*,

ketiga gaya tersebut merupakan input yang terletak pada ujung *edges* pisau pahat, dimana masing-masing gaya didefinisikan menjadi gaya pada arah sumbu x (radial), sumbu y (tangensial), dan sumbu z (axial) seperti yang terlihat pada gambar 3.16 berikut. Parameter nilai gaya eksitasi didapatkan dari hasil perhitungan pada persamaan 3.21.



Gambar 3. 16 Force on Machining Process

Tabel 3. 3 Excitation Force

No	Cutting Force				Chatter
	Ft (N)	Fc (N)	Fr (N)	Fm (N)	ω_c (Hz)
1	8,12	21,37	14,74	27,21	165,67
2	16,24	42,75	29,49	54,42	181,17
3	8,12	21,37	14,74	27,21	142,18
4	16,24	42,75	29,49	54,42	157,68
5	8,12	21,37	14,74	27,21	88,87
6	16,24	42,75	29,49	54,42	104,37
7	15,39	40,5	27,94	51,55	364,22
8	30,78	81	55,89	103,11	379,72
9	46,17	121,5	83,83	154,66	395,22
10	61,56	162	111,78	206,22	410,72
11	76,95	202,5	139,72	257,78	426,22
12	15,39	40,5	27,94	51,55	340,73
13	30,78	81	55,89	103,11	356,23
14	61,56	162	111,78	206,22	387,23
15	76,95	202,5	139,72	257,78	402,73
16	15,39	40,5	27,94	51,55	287,53
17	30,78	81	55,89	103,11	303,03
18	46,17	121,5	83,83	154,66	318,53
19	21,8	57,37	39,58	73,03	562,49
20	43,6	114,75	79,17	146,07	577,99
21	21,8	57,37	39,58	73,03	539,28
22	43,6	114,75	79,17	146,07	554,78
23	65,4	172,12	118,76	219,11	570,28
24	21,8	57,37	39,58	73,03	486,08

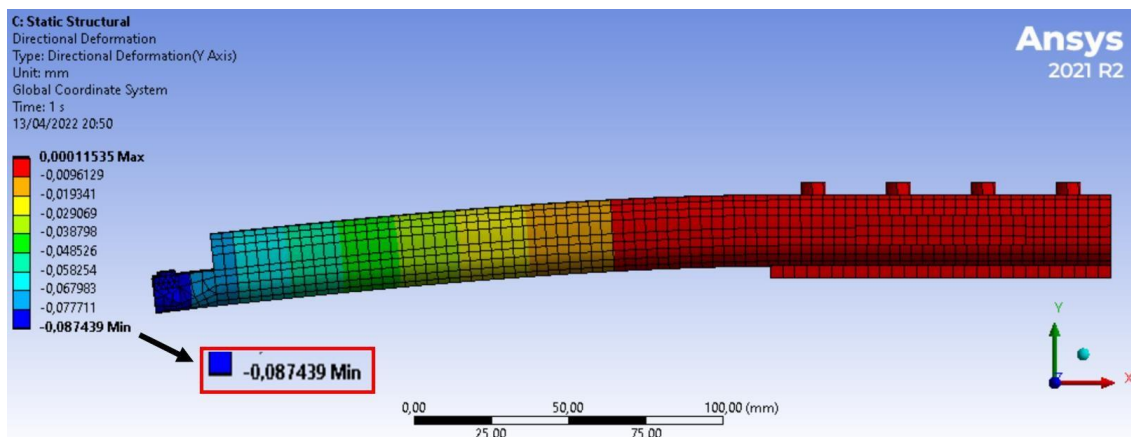
25	43,6	114,75	79,17	146,07	501,58
26	65,4	172,12	118,76	219,11	517,08
27	109,01	286,87	197,94	365,18	548,08

2. *Boring Bar*

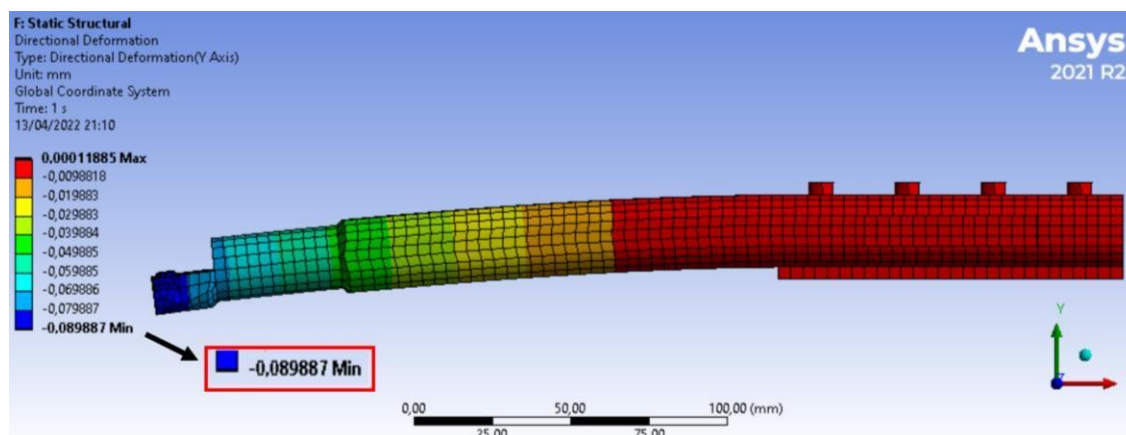
Adapun parameter yang akan dianalisis pada penelitian ini merupakan parameter dari regular *boring bar* dan *customized boring bar* diantaranya yaitu sebagai berikut.

- Nilai konstanta kekakuan ekuivalen *boring bar* (K_{IR} dan K_{IC})
 Penentuan nilai konstanta kekakuan sistem utama (K) didapatkan dari mensimulasikan sistem utama menggunakan *Ansys Static Structural*. Saat proses pembubutan, *boring bar* mengalami defleksi statis akibat gaya eksitasi dari mata bor sehingga nilai konstanta kekakuan bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan 3.18.

Nilai konstanta kekakuan ekuivalen *boring bar* pada bagian tepi insert dihitung dengan menggunakan simulasi static structural pada software *Ansys* dengan memberikan *fixed support* pada bagian penampang belakang dan gaya terpusat pada bagian *edge nose insert* sebesar 100 N kearah y sebagaimana pada gambar 3.17 berikut.



(a)

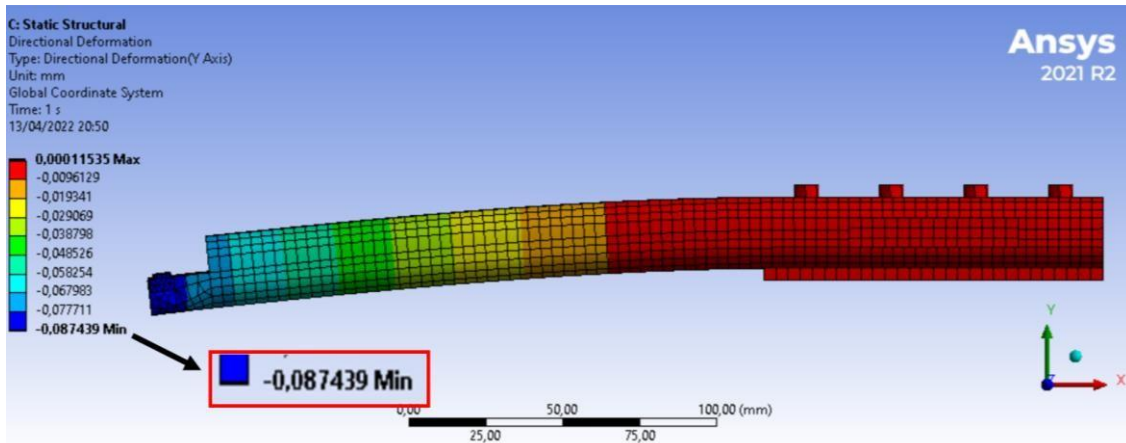


(b)

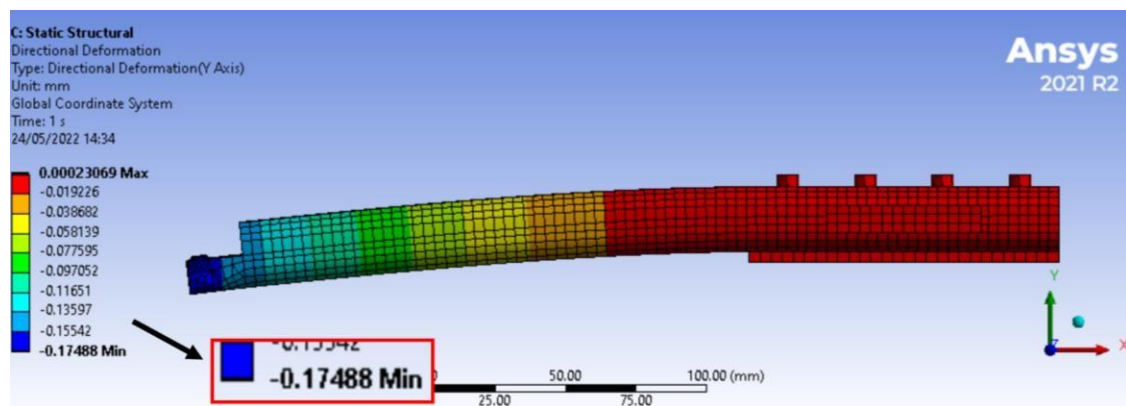
Gambar 3. 17 Simulation of y-axis static deflection (a) regular boring bar and (b) customized boring bar

Pada gambar 3.17 dapat dilihat bahwa *regular boring bar* memiliki deformasi statis maksimal sebesar 0,087439 mm dan *customized boring bar* sebesar 0,089887 mm. Didapat nilai kekakuan *regular boring bar* (K_{IR}) = 1143654 N/m dan kekakuan sistem utama yakni *customized boring bar* (K_{1C}) = 1112507 N/m.

Untuk membuktikan nilai kekakuan pada *boring bar* bernilai tetap, maka dilakukan simulasi kembali dengan memberikan beberapa *input gaya* yang berbeda yaitu sebagai berikut.



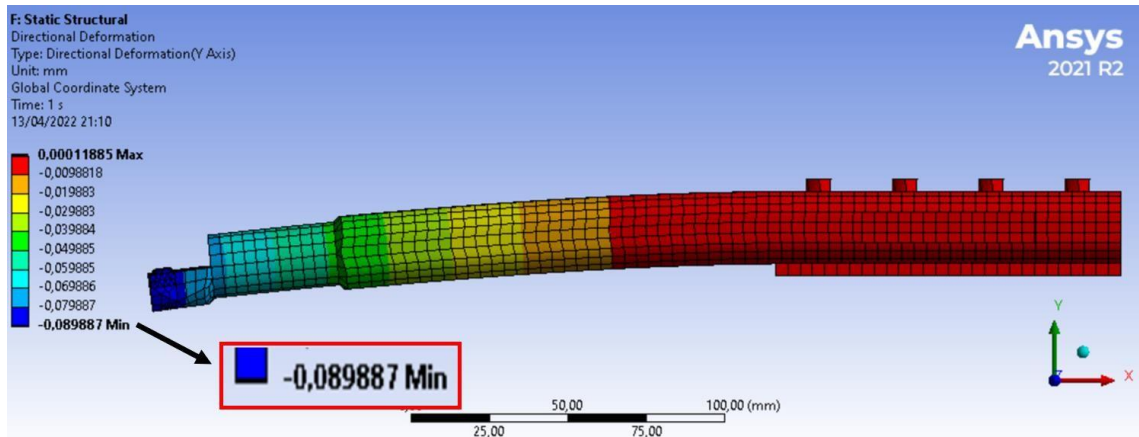
(a)



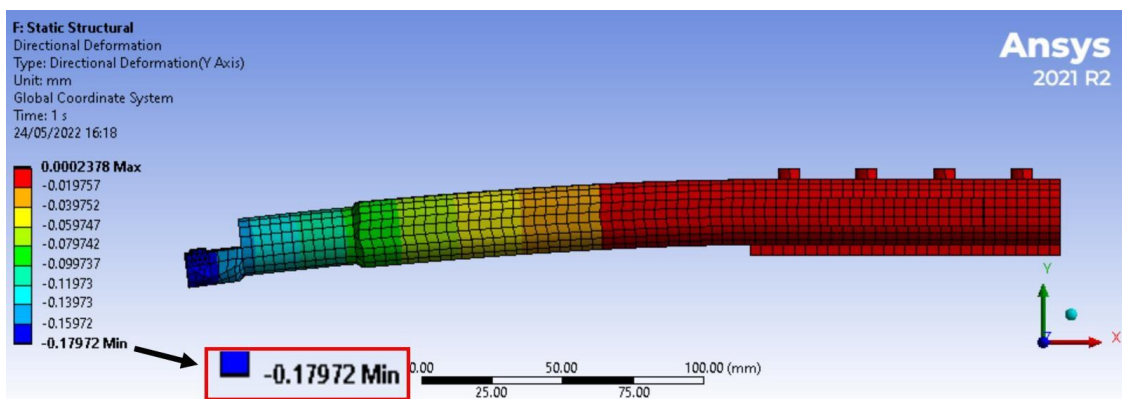
(b)

Gambar 3. 18 Simulation of *y-axis static deflection of regular boring bar with given input force* (a) 100 N and (b) 200 N

Gambar 3.18 merupakan hasil simulasi *regular boring bar* dengan diberikan *input gaya* sebesar 100 N dan 200 N. Dihasilkan nilai defleksi statis arah sumbu-y (a) sebesar 0,087439 mm dan (b) 0,17488 mm.



(a)



(b)

Gambar 3. 19 Simulation of *y*-axis static deflection customized boring bar with given input force (a) 100 N and (b) 200 N

Pada gambar 3.19 merupakan hasil simulasi *customized boring bar* dengan diberikan *input* gaya sebesar 100 N dan 200 N. Dihasilkan nilai defleksi statis arah sumbu-*y* (a) sebesar 0,089887 mm dan (b) 0,17972 mm. Selain itu untuk membuktikan apakah nilai kekakuan bernilai tetap, maka diberikan lagi *input* nilai gaya yang berbeda yaitu 300 N dan 400 N. Setelah mendapatkan nilai defleksi dengan menggunakan simulasi ANSYS, maka dapat dicari nilai kekakuan dengan menggunakan perumusan 3.18 diatas. Berikut merupakan hasil nilai perhitungan yang didapat ditunjukkan pada tabel 3.4 berikut ini.

Tabel 3. 4 Effect of Force Variation on Boring Bar Stiffness Value

Boring Bar	F (N)	δ_{st} (mm)	K (N/m)
Regular	100	0,087439	1143654
	200	0,17488	1143654
	300	0,26232	1143589
	400	0,34976	1143560
Customized	100	0,089887	1112507

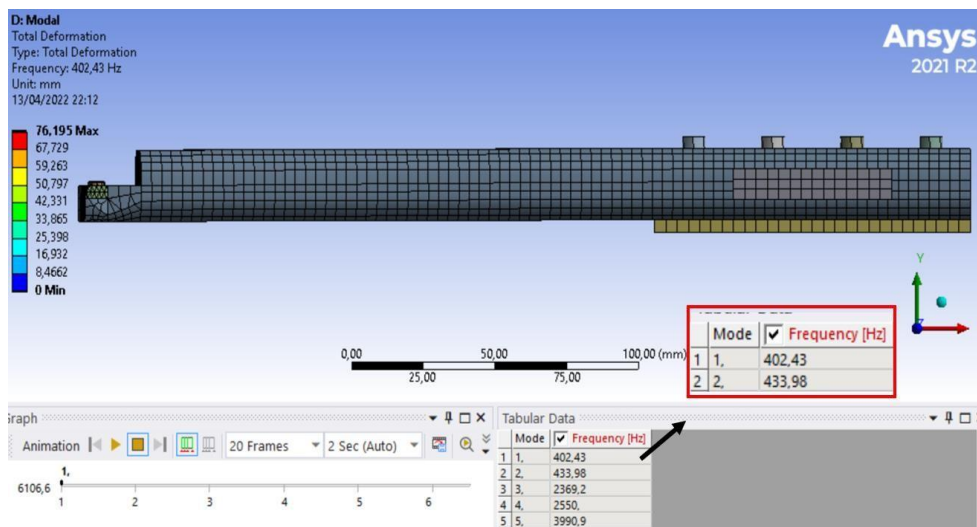
	200	0,17972	1112489
	300	0,26958	1112489
	400	0,35943	1112453

▪ Massa ekuivalen boring bar (M_{1R} dan M_{1C})

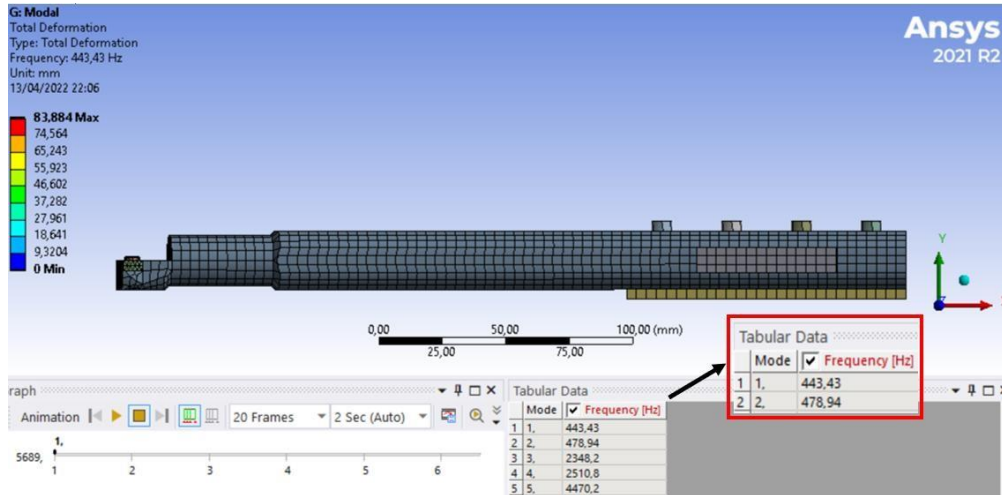
Penentuan nilai berat massa dari sistem utama (M) didapatkan dari mensimulasikan sistem utama menggunakan modal pada *software* Ansys. Penentuan massa dari sistem utama didapatkan dari simulasi *Ansys*. Dari simulasi tersebut, didapatkan nilai frekuensi natural dari sistem utama yang kemudian digunakan untuk menghitung massa dari sistem utama tersebut dengan menggunakan persamaan.

$$\omega_n^2 = \frac{K}{M} \dots \dots \dots (3.22)$$

Didapatkan frekuensi natural pada *regular boring bar* adalah senilai 402,43 Hz. Frekuensi natural pada *customized boring bar* adalah senilai 443,43 Hz. Massa ekuivalen didapat dengan persamaan dimana frekuensi natural *regular boring bar* (ω_{n1R}) dengan nilai 433,98 Hz setara dengan 2721 rad/s dan frekuensi natural *customized boring bar* (ω_{n1C}) dengan nilai 478,94 Hz setara dengan 3003 rad/s. Frekuensi natural pada kedua *boring bar* tersebut ditunjukkan pada gambar 3.20 berikut.



(a)



(b)

Gambar 3. 20 Simulation of natural frequency modal analysis (a) regular boring bar and (b) customized boring bar

- Massa ekuivalen *regular boring bar* (M_{1R}):

$$M_{1R} = \frac{K_{1R}(\text{sumbu} - y)}{\omega_{n1R}(\text{sumbu} - y)^2}$$

$$M = \frac{1143654 \text{ N/m}}{(2721 \text{ rad/s})^2}$$

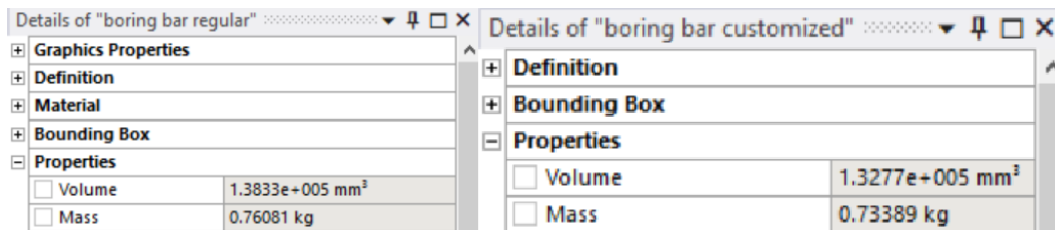
$$M_{1R} = 0,1544 \text{ kg}$$

- Massa ekuivalen sistem utama *customized boring bar* (M_{1C}):

$$M_{1C} = \frac{K_{1C}(\text{sumbu} - y)}{\omega_{n1C}(\text{sumbu} - y)^2}$$

$$M = \frac{1112507 \text{ N/m}}{(3003 \text{ rad/s})^2}$$

$$M_{1C} = 0,1502 \text{ kg}$$



(a)

(b)

Gambar 3. 21 Mass Properties of (a) Regular Boring Bar and (b) Customized Boring Bar

Tabel 3. 5 Mass Value Parameter of Boring Bar

	<i>Regular Boring Bar (Kg)</i>	<i>Customized Boring Bar (Kg)</i>
ANSYS Properties	0.76081	0.73389
Simulasi Modal $M = \frac{\kappa}{\omega_n^2}$	0.1544	0.1502

Tabel 3.5 merupakan tabel perbandingan massa *boring bar* yang terdapat pada menu *properties* Ansys dan massa ekuivalen dengan perhitungan rumus. Nilai ANSYS *properties* tersebut menunjukkan nilai massa *boring bar* secara keseluruhan yang muncul pada ANSYS ketika *boring bar* diberikan material pada tiap-tiap komponen penyusun. Kemudian untuk nilai modal tersebut didapatkan dari frekuensi natural pada ANSYS *modal* yang berikutnya dimasukkan pada rumus yang terlampir pada tabel. Dapat dilihat bahwa nilai massa dari kedua sumber memiliki nilai yang cukup berbeda karena ANSYS *properties* merupakan massa dari banyak *degree of freedom* (DOF) yang ada pada system tersebut. Sedangkan simulasi ANSYS *modal* menghasilkan massa ekuivalen dari sistem tersebut (satu DOF) yang ditinjau dari titik yang diberikan *input* berupa gaya.

- Nilai konstanta redaman *boring bar*
 Pada penelitian ini, didapatkan nilai konstanta redaman *boring bar* dari *damping ratio* (ζ_s) yang didapatkan dari penelitian terdahulu yaitu pada jurnal (Liu, Liu, & Wu, 2018) dengan nilai sebesar 0,005 pada material *steel*. Dengan demikian didapatkan nilai konstanta redaman *regular boring bar* dan sistem utama yakni *customized boring bar* sebagai berikut.

- Konstanta redaman sistem utama *boring bar* (C_1):

$$C_1 = 2\zeta_s \sqrt{M_1 K_1} \dots\dots\dots (3.23)$$

- Konstanta redaman *regular boring bar* (C_{1R}):

$$C_{1R} = 2 \zeta_1 \sqrt{M_{1R} K_{1R}}$$

$$C_{1R} = 2 \cdot 0,005 \cdot \sqrt{0,1544 \text{ kg } 1143654 \text{ N/m}}$$

$$C_{1R} = 4,2 \text{ N.s/m}$$

- Konstanta redaman sistem utama *customized boring bar* (C_{1C}):

$$C_{1C} = 2 \zeta_1 \sqrt{M_{1C} K_{1C}}$$

$$C_{1C} = 2 \cdot 0,005 \cdot \sqrt{0,1502 \text{ kg } 1112507 \text{ N/m}}$$

$$C_{1C} = 4 \text{ N.s/m}$$

Tabel 3. 6 Parameters in Boring Bar Research

No	Parameter	K_1 (N/m)	M_1 (Kg)	C_1 (N.s/m)	ω_{n1} (Hz)	ζ_1
1	<i>Regular Boring Bar</i>	1143654	0,1544	4,2	433,98	0,005
2	<i>Customized Boring bar</i>	1112507	0,1502	4	478,94	0,005

3. DVA

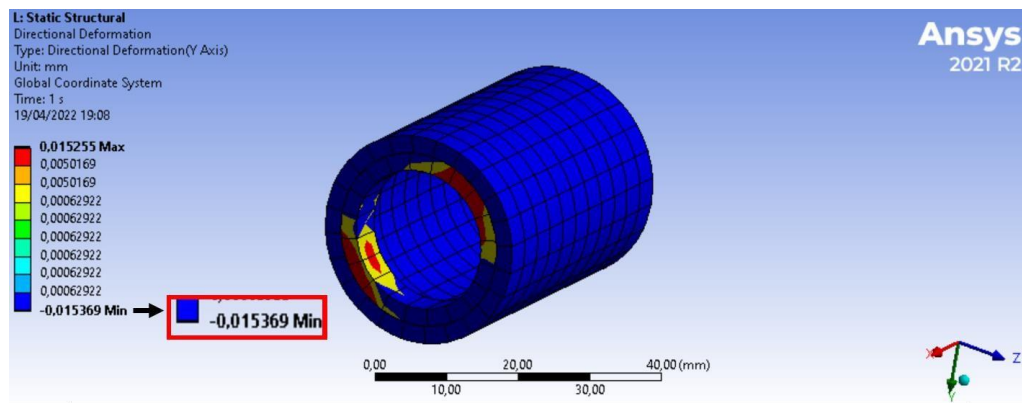
Adapun parameter dari komponen DVA yang dibutuhkan dalam penelitian ini diantara lain sebagai berikut.

- Penentuan nilai konstanta kekakuan ekuivalen DVA (K_2 neo dan K_2 nat)

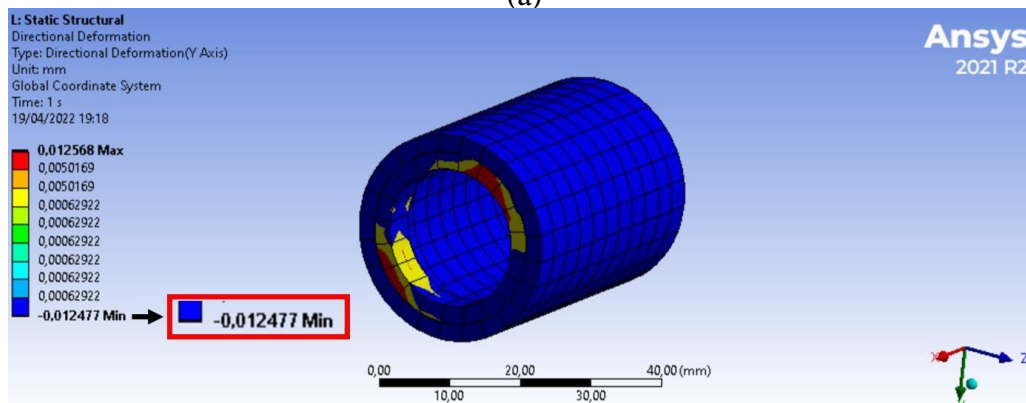
Pada penelitian ini menggunakan 2 jenis karet, yaitu karet *neoprene* dan karet natural. Kemudian adanya beban berat *mass ring* yakni $mass\ ring \times standard\ earth\ gravity = 0,0753\ Kg \times 9,8\ m/s^2 = 0,73594\ N$, dimana *mass ring* didapat melalui menu *properties* pada software ansys pada gambar 3.21 Diperoleh deformasi statis pada arah sumbu y sebesar 0,015369 mm pada material *neoprene rubber* dan 0,012477 mm pada material *natural rubber* sebagaimana tertera pada gambar 3. 22 berikut. Dimensi dan material dari karet dirancang sedemikian rupa agar DVA memiliki frekuensi natural yang sama dengan frekuensi gaya eksitasi yakni pada rentang 88,87 – 577,99 Hz.

Details of "Massa DVA"	
+ Graphics Properties	
+ Definition	
+ Material	
+ Bounding Box	
- Properties	
<input type="checkbox"/> Volume	8625,4 mm ³
<input type="checkbox"/> Mass	7,53e-002 kg
Centroid X	-77,346 mm
Centroid Y	102,86 mm

Gambar 3. 22 Ansys Properties of Mass Ring



(a)



(b)

Gambar 3. 23 Static Deformation (a) *neoprene rubber* dan (b) *natural rubber*

- *Neoprene rubber:*

$$K_{2\text{ neo}} = W / \delta_{St} \cdot 0,5$$

$$K_{2\text{ neo}} = 0,73594 \text{ N} / 0,000015369 \text{ m} \cdot 0,5$$

$$K_{2\text{ neo}} = 23942 \text{ N/m}$$

- *Natural rubber:*

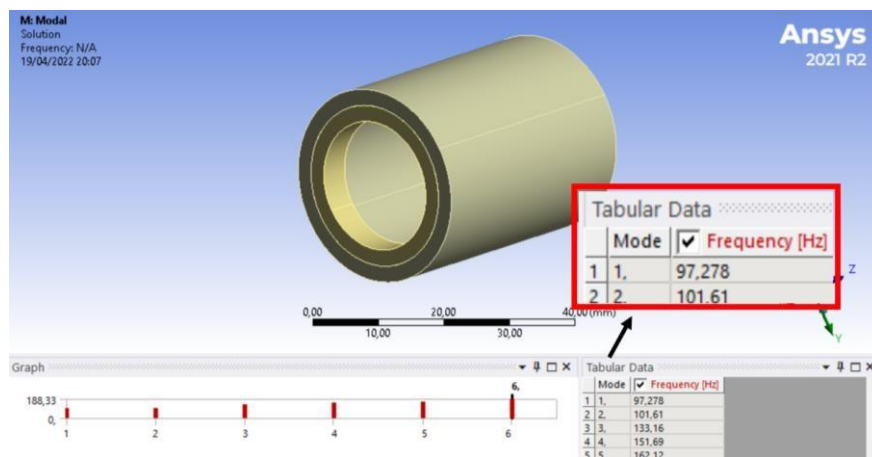
$$K_{2\text{ nat}} = W / \delta_{St} \cdot 0,5$$

$$K_{2\text{ nat}} = 0,73594 \text{ N} / 0,000012477 \text{ m} \cdot 0,5$$

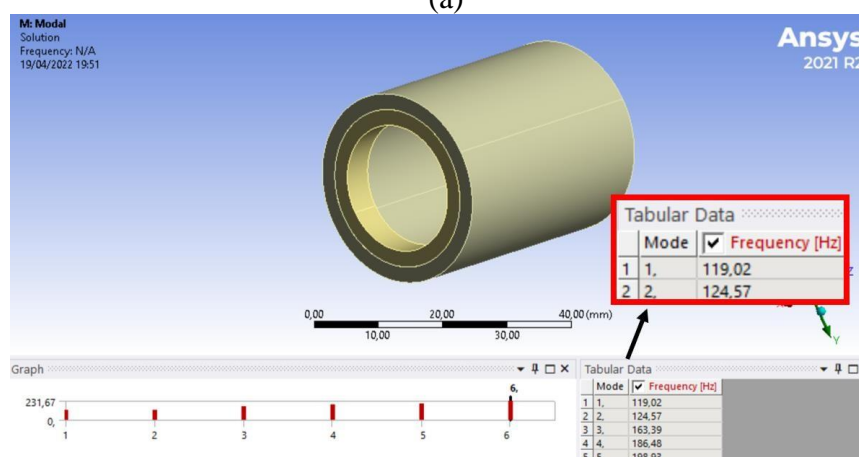
$$K_{2\text{ nat}} = 29491 \text{ N/m}$$

- Massa ekuivalen DVA ($M_{2\text{ neo}}$ dan $M_{2\text{ nat}}$)

Sama halnya pada penentuan massa ekuivalen pada *boring bar*, massa ekuivalen pada DVA didapat dengan mengolah data konstanta kekakuan ekuivalen dengan frekuensi natural DVA yang mana diperoleh dari simulasi *software ansys modal*. Berikut merupakan hasil simulasi frekuensi natural pada DVA dengan 2 karet pada material *neoprene rubber* dan *natural rubber* sebagaimana pada gambar 3.24 berikut.



(a)



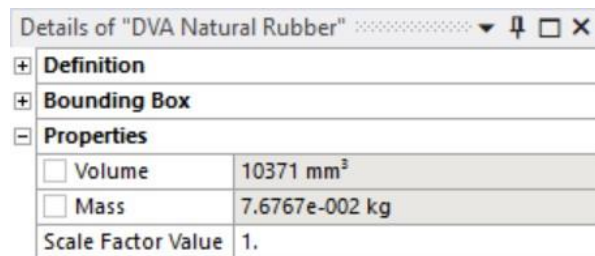
(b)

Gambar 3. 24 *Natural DVA Frequency Simulation with 2 Rubber Materials (a) Neoprene Rubber and (b) Natural Rubber*

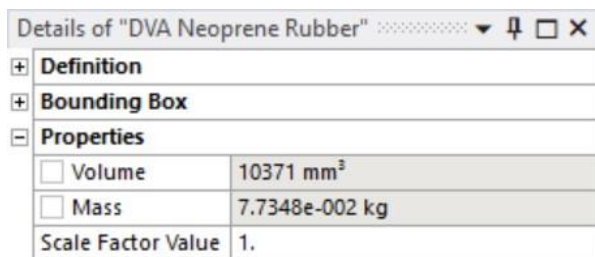
Berdasarkan hasil simulasi frekuensi natural DVA pada 2 buah karet material *natural* dan *neoprene* dengan menggunakan ANSYS Modal, didapatkan frekuensi natural DVA pada

masing-masing material karet. Frekuensi natural DVA pada dua buah karet material *natural* yakni 97 Hz yang setara dengan 609 rad/s sedangkan menggunakan dua buah karet material *neoprene* yakni sebesar 119 Hz yang setara dengan 747 rad/s. Nilai konstanta kekakuan dua buah karet *neoprene* adalah $23942 \text{ N/m} \times 2 = 47884 \text{ N/m}$ dan material karet *natural* adalah $29491 \text{ N/m} \times 2 = 58982 \text{ N/m}$, maka didapat nilai massa equivalent pada permukaan luar karet adalah sebagai berikut.

- Massa ekuivalen DVA dengan *neoprene rubber*:
 $M_{2_{neo}} = K_2_{neo} / \omega_2_{neo}^2$
 $M_{2_{neo}} = 47884 \text{ N/m} / (609 \text{ rad/s})^2$
 $M_{2_{neo}} = 0,0589 \text{ kg}$
- Massa ekuivalen DVA dengan *natural rubber*:
 $M_{2_{nat}} = K_2_{nat} / \omega_2_{nat}^2$
 $M_{2_{nat}} = 58982 \text{ N/m} / (747 \text{ rad/s})^2$
 $M_{2_{nat}} = 0,0601$



(a)



(b)

Gambar 3. 25 Ansys Properties of (a) DVA Natural Rubber and (b) DVA Neoprene Rubber

Tabel 3. 7 Mass Value Parameter of Rubber

	DVA Natural Rubber	DVA Neoprene Rubber
ANSYS Properties	0.0767	0.0773
Simulasi Modal $M = \frac{K}{\omega n^2}$	0.0589	0.0601

Sama halnya seperti massa dari *boring bar* sebelumnya, dimana massa dari menu *properties* Ansys dan perhitungan simulasi *modal* memiliki nilai yang cukup berbeda karena *properties* Ansys merupakan massa dari banyak *degree of freedom* (DOF) yang ada pada sistem tersebut. Sedangkan simulasi *modal* Ansys menghasilkan massa ekuivalen dari sistem tersebut (satu DOF).

- Konstanta redaman DVA ($C_{2 \text{ nat}}$ dan $C_{2 \text{ neo}}$)
Untuk penentuan nilai konstanta redaman pada sistem utama, konstanta redaman pada DVA didapatkan dari *damping ratio* (ζ_r) yang didapat dari penelitian terdahulu, yang mana memiliki nilai beragam antara 0,02 hingga 0,2. Namun, pada penelitian ini digunakan *damping ratio* 0,02 pada material *rubber*. Dengan demikian didapatkan nilai konstanta redaman DVA dengan *neoprene rubber* dan DVA dengan *natural rubber* sebagai berikut.

- Konstanta redaman DVA dengan *neoprene rubber* ($C_{2 \text{ neo}}$):

$$C_{2 \text{ neo}} = 2\zeta_s \sqrt{M_{2 \text{ neo}} K_{2 \text{ neo}}}$$

$$C_{2 \text{ neo}} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,12 \text{ kg} \cdot 47884 \text{ N/m}}$$

$$C_{2 \text{ neo}} = 3,03 \text{ N.s/m}$$

- Konstanta redaman DVA dengan *natural rubber* ($C_{2 \text{ neo}}$):

$$C_{2 \text{ nat}} = 2\zeta_s \sqrt{M_{2 \text{ nat}} K_{2 \text{ nat}}}$$

$$C_{2 \text{ nat}} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,1 \text{ kg} \cdot 58982 \text{ N/m}}$$

$$C_{2 \text{ nat}} = 3,07 \text{ N.s/m}$$

Sehubungan dengan diketahuinya nilai konstanta dari tiap jenis karet, maka nilai konstanta redaman DVA pada tiap variasi dapat dihitung dengan penjelasan sebagai berikut.

- Konstanta redaman DVA dengan variasi ANA ANA:

$$C_{\text{ANA ANA}} = 2\zeta_s \sqrt{M_{\text{ANA ANA}} K_{\text{ANA ANA}}}$$

$$C_{\text{ANA ANA}} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,13 \text{ kg} \cdot 165848 \text{ N/m}}$$

$$C_{\text{ANA ANA}} = 5,87 \text{ N.s/m}$$

- Konstanta redaman DVA dengan variasi ANA N ANA:

$$C_{\text{ANA N ANA}} = 2\zeta_s \sqrt{M_{\text{ANA N ANA}} K_{\text{ANA N ANA}}}$$

$$C_{\text{ANA N ANA}} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,13 \text{ kg} \cdot 189790 \text{ N/m}}$$

$$C_{\text{ANA N ANA}} = 6,29 \text{ N.s/m}$$

- Konstanta redaman DVA dengan variasi ANA A ANA:

$$C_{\text{ANA A ANA}} = 2\zeta_s \sqrt{M_{\text{ANA A ANA}} K_{\text{ANA A ANA}}}$$

$$C_{\text{ANA A ANA}} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,13 \text{ kg} \cdot 195339 \text{ N/m}}$$

$$C_{\text{ANA A ANA}} = 6,38 \text{ N.s/m}$$

- Konstanta redaman DVA dengan variasi NANANANA:

$$C_{\text{NANANANA}} = 2\zeta_s \sqrt{M_{\text{NANANANA}} K_{\text{NANANANA}}}$$

$$C_{\text{NANANANA}} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,13 \text{ kg} \cdot 213732 \text{ N/m}}$$

$$C_{\text{NANANANA}} = 6,67 \text{ N.s/m}$$

- Konstanta redaman DVA dengan variasi NAAAAAAN:

$$C_{\text{NAAAAAAN}} = 2\zeta_s \sqrt{M_{\text{NAAAAAAN}} K_{\text{NAAAAAAN}}}$$

$$C_{\text{NAAAAAAN}} = 2 \cdot 0,02 \cdot \sqrt{0,13 \text{ kg} \cdot 224830 \text{ N/m}}$$

$$C_{\text{NAAAAAAN}} = 6,84 \text{ N.s/m}$$

Tabel 3. 8 DVA Variation Parameters

No	Parameter	K (N/m)	M (Kg)	C (N.s/m)	ω_n (Hz)	ζ
1	ANA ANA	165848	0,13	5,87	283,47	0,02
2	ANA N ANA	189790	0,13	6,29	299,93	0,02
3	ANA A ANA	195339	0,13	6,38	308,13	0,02
4	NANANANA	213732	0,13	6,67	315,38	0,02
5	NAAAAAAN	224830	0,13	6,84	325,25	0,02

Keterangan:

1. ANA ANA (DVA 1) : 2 Natural 1 Neoprene dikiri, 2 Natural 1 Neoprene dikanan
2. ANA N ANA (DVA 2) : 2 Natural 1 Neoprene dikiri, 1 Neoprene ditengah, 2 Natural 1 Neoprene dikanan
3. ANA A ANA (DVA 3) : 2 Natural 1 Neoprene dikiri, 1 Natural ditengah, 2 Natural Neoprene dikanan
4. NANANANA (DVA 4) : 4 Natural, 4 Neoprene
5. NAAAAAAN (DVA 5) : 6 Natural, 2 Neoprene

3.2.9 Simulasi

Seperti yang sudah dilakukan pada tahap sebelumnya bahwa simulasi dilakukan dengan metode elemen hingga (*finite element analysis*) menggunakan *Workbench Ansys*. Pada subbab kali ini akan diringkas tahapan mengenai prosedur umum analisis yang dilakukan dalam simulasi pada penelitian ini serta pada tahap akhir akan digunakan simulasi *modal* yang dihubungkan dengan *harmonic response* pada software Ansys. Berikut merupakan tahapan dan poin penting dalam melakukan simulasi.

1. *Pre-processing*

Pada tahapan ini meliputi definisi *material properties*, dan pemodelan serta *meshing*. Terdapat dua material yang digunakan dalam penelitian yaitu material AISI 1045 dan carbide. Berikut tabel 3.9 merupakan material properties yang digunakan pada simulasi tugas akhir ini.

a. *Engineering Data*

Berikut merupakan *material properties* yang nantinya akan dimasukkan pada menu *engineering data*.

Tabel 3. 9 Material Properties

<i>Mechanical Properties</i>	<i>Holder, Bolt</i>	<i>Insert</i>	<i>Rubber 1</i>	<i>Rubber 2</i>	<i>Mass Ring</i>
Material	AISI 4140	Carbide	Neoprene Rubber	Natural Rubber	Brass
<i>Density (Kg/m³)</i>	7850	15630	1250	920	8730
<i>Young Modulus (GPa)</i>	210	530	0,001	0,0015	119
<i>Poissons Ratio</i>	0,3	0,31	0,48	0,49	0,35
<i>Bulk Modulus (GPa)</i>	175	465	0,0083	0,025	133
<i>Shear Modulus (GPa)</i>	81	202,2	0,0003	0,0005	44
<i>Damping Ratio</i>	0,005	0,005	0,02	0,02	0,005

Terdapat lima material yang digunakan dalam penelitian yaitu AISI 4140 untuk *holder* dan *bolt*, *carbide* untuk *insert*, *neoprene rubber* sebagai material karet 1, *natural rubber* sebagai material karet 2, dan *brass* untuk *mass ring*.

b. Geometri

Adapun variasi desain yang nantinya akan digunakan dalam penelitian ini. Pemodelan ini di desain sesuai geometri yang telah ditentukan dengan menggunakan *software Solidwork*. Desain tersebut terbagi menjadi 6 variasi desain *boring bar L/D overhang 8*, yaitu 1 *regular boring bar* dan *customized boring bar* dengan 5 variasi posisi karet DVA. Berikut gambar 3.26 merupakan desain yang nantinya akan digunakan.



Gambar 3. 26 Customized Geometry Boring Bar with 6 Position Variations of DVA Rubber

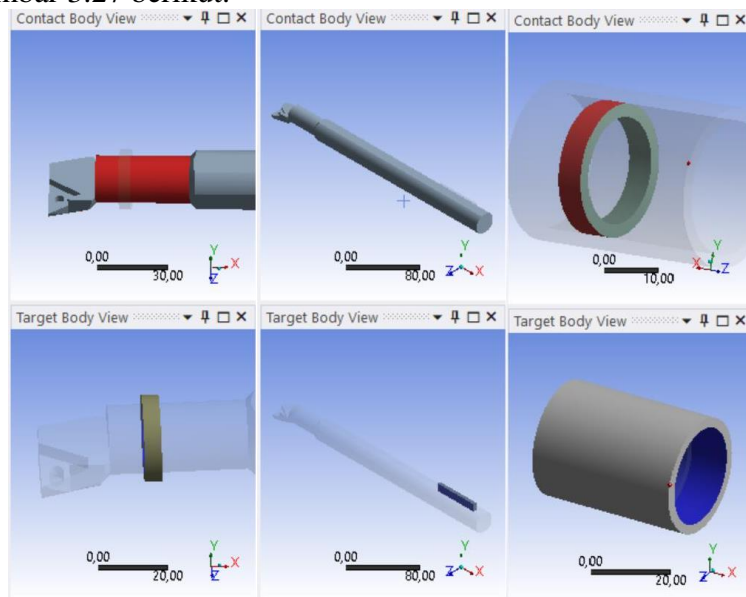
Keterangan:

- a) *Regular boring bar L/D overhang 8*
- b) *Customized boring bar L/D overhang 8 variasi 6 karet ANA ANA*

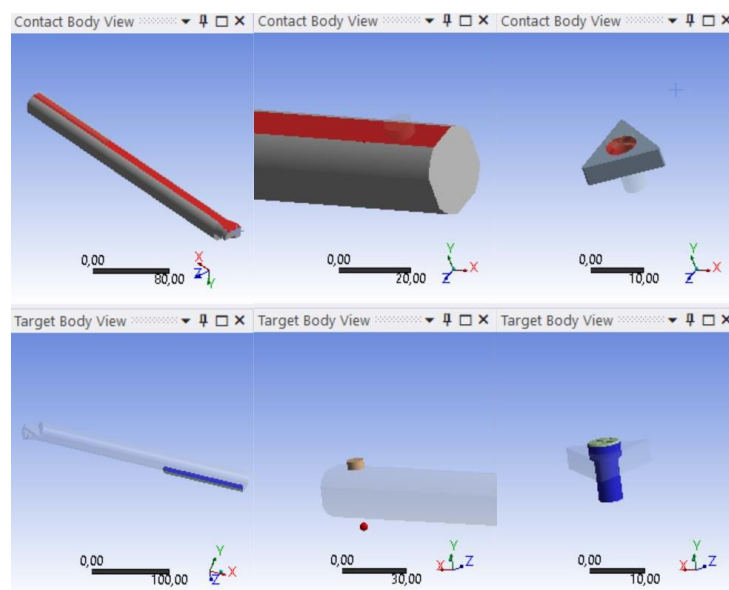
- c) Customized boring bar L/D overhang 8 variasi 7 karet ANA N ANA
- d) Customized boring bar L/D overhang 8 variasi 7 karet ANA A ANA
- e) Customized boring bar L/D overhang 8 variasi 8 karet NAAAAAN
- f) Customized boring bar L/D overhang 8 variasi 8 karet NANANANA

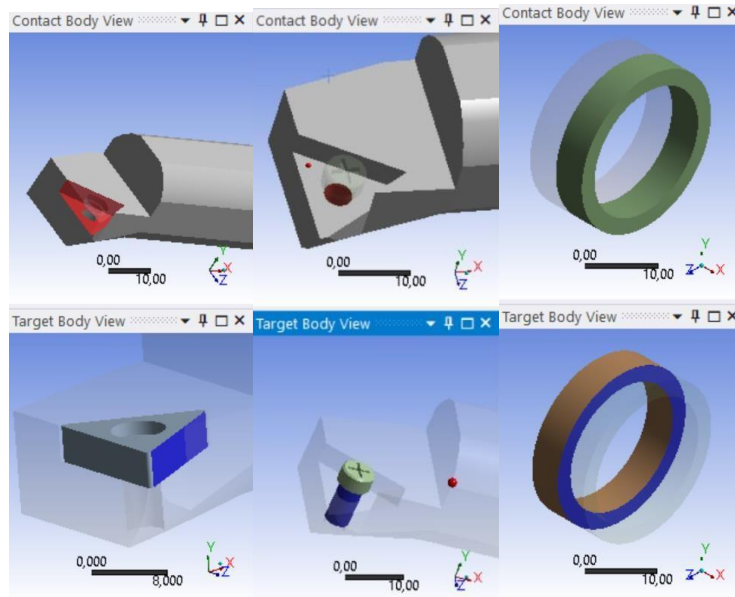
c. Connection

Terdapat 2 jenis *connection* yang akan digunakan pada penelitian ini yakni *rough* dan *bonded*, pada *rough connection* kedua permukaan benda dapat bergerak bebas pada arah normal namun tidak dapat bergerak kearah tangensial, digunakan pada kontak permukaan karet dengan metal dengan asumsi koefisien statis antar permukaan karet dengan metal = 1. Sedangkan pada *bonded connection* kedua permukaan tidak dapat bergerak kearah normal maupun tangensial, digunakan pada kontak permukaan metal dengan metal dan karet dengan karet sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.27 berikut.



(a)



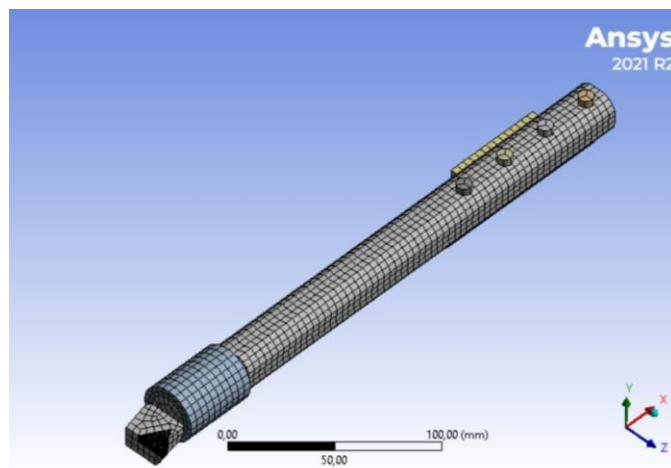


(b)

Gambar 3. 27 (a) *Rough connection* dan (b) *bonded connection*

d. Mesh

Meshing merupakan metode *finite element* sebagai pendekatan pada wujud yang asli, dimana pada tahap ini akan dibahas mengenai detail *sizing* dari tiap komponen. *Element size* dari tiap komponen berbeda-beda sesuai dengan kompleksitas dari geometrinya. *Element size* secara global yaitu sebesar 4 mm. *Element size* untuk *insert*, *bolt*, dan *tool post* yaitu sebesar 2 mm. Kemudian diberikan metode *multizone* pada seluruh permukaan *boring bar* guna untuk mendekomposisikan geometri secara otomatis. Terdapat 44780 *node* dan 27350 *elements* pada geometri sistem utama dengan DVA 8 karet. Dimana memiliki *element quality* minimum 0,0013578, maksimum 1, dan rata-rata *mesh metric* berdasarkan *orthogonal quality* nya yaitu 0,58434 seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.28 berikut ini.



(a)

Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	1,3578e-003
<input type="checkbox"/> Max	1,
<input type="checkbox"/> Average	0,58434
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,16651
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	44780
<input type="checkbox"/> Elements	27350

(b)

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:

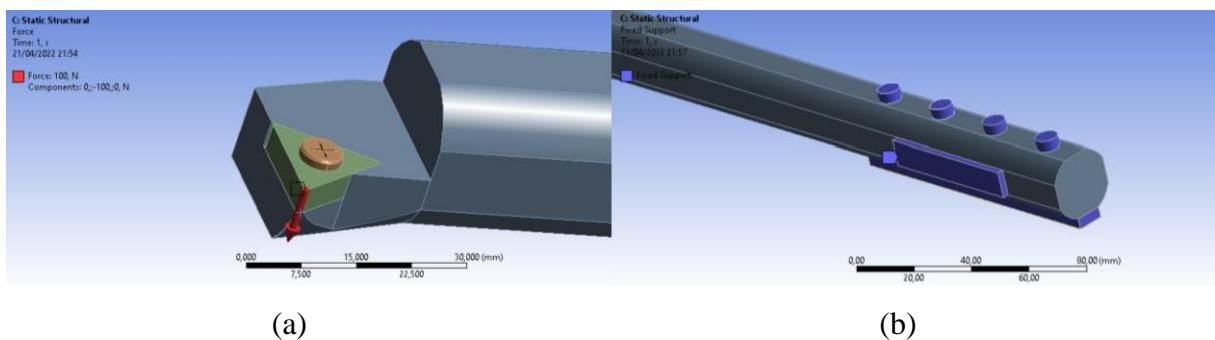


(c)

Gambar 3. 28 (a) Mesh (b) mesh quality (c) quality parameter orthogonal quality

2. Solution

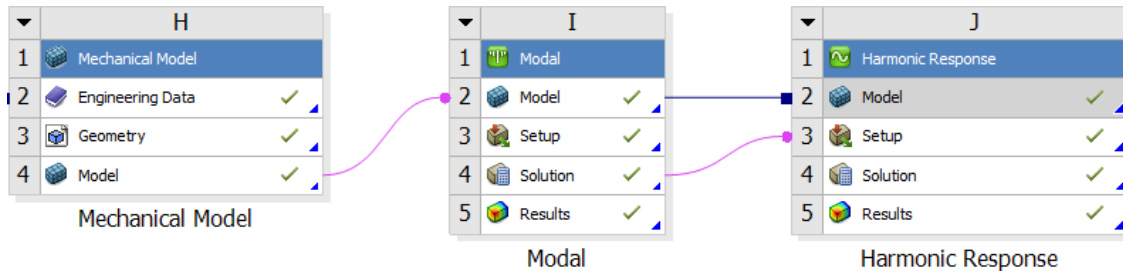
Pada tahapan ini meliputi pemberian gaya eksitasi dan *fixed support* pada *boring bar* serta *apply boundary condition & load* dan menetapkan tipe analisis yakni *ANSYS modal workbench* dan *ANSYS harmonic response workbench*. Gaya eksitasi yang diterima diasumsikan terpusat pada bagian *edge* di *nose insert*, hal ini dikarenakan pemotongan dilakukan pada kondisi *finish cut* dimana *depth of cut* sangat kecil. *Fixed support* diletakkan pada bagian penampang belakang dimana *boring bar* menerima gaya tekan antara *clamp bolt* dan *tool post* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.29 berikut.



Gambar 3. 29 (a) Excitation force at the edge of the boring bar blade (b) fixed support at the back of the boring bar

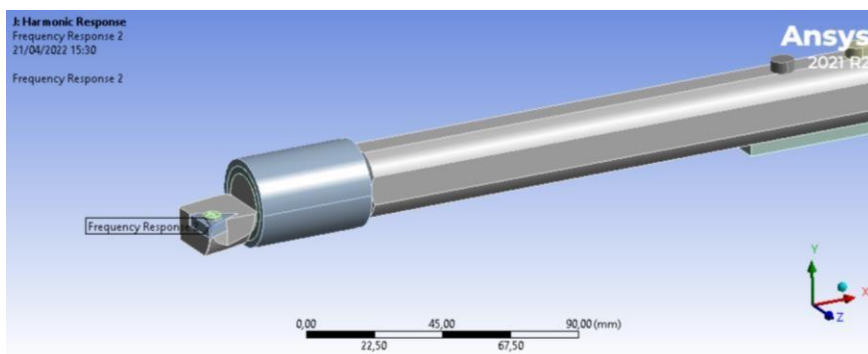
ANSYS Modal Workbench merupakan bagian dari *ANSYS workbench* yang memiliki fungsi untuk mencari frekuensi natural, sedangkan *ANSYS Harmonic Response* yang dihubungkan dengan modal memiliki fungsi untuk *plotting* hasil *modal analysis* pada berbagai *output* seperti deformasi pada frekuensi gaya tertentu dan juga *bode diagram*. Pada simulasi menggunakan *software ansys* ini, *engineering data*, geometri, model, dan *solution* pada modal diberi garis hubung dengan *harmonic response* seperti pada gambar 3.30, kemudian setelah melakukan input *engineering data*, *input geometry*, *input connection*, dan *meshing*, pada simulasi modal diberi *input fixed support* kemudian *max modes* disetting hingga mode yang muncul melebihi 1000 Hz, hal ini dilakukan karena *bode diagram* yang menjadi *output* akan disetting dari 100 Hz – 1000 Hz. Kemudian setelah *mode* pada geometri muncul, pada *harmonic*

response diberikan input gaya eksitasi sesuai pada tabel 3.2 pada ujung insert. *Solution* pada *harmonic response* yang akan diambil adalah *directional* deformation arah x, y, dan z pada frekuensi eksitasi yang tertera pada tabel 3.2, dan *frequency response* dengan display *bode diagram*.

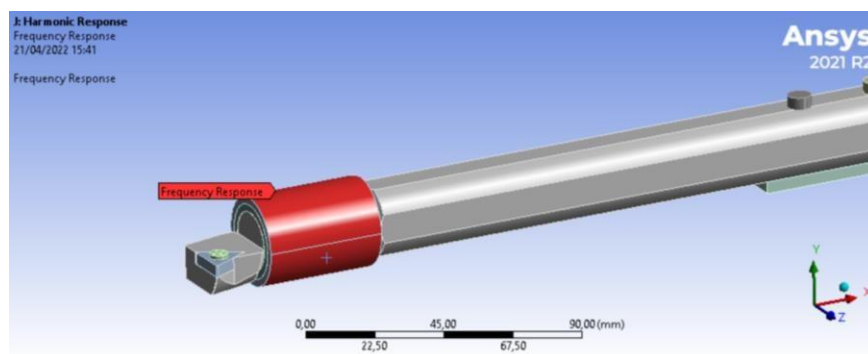


Gambar 3. 30 *Ansys modal analysis and harmonic response workbench setup*

Respon yang dianalisis seperti pada gambar 3.31 adalah 1 *edge* pada bagian tepi insert guna mengetahui respon reduksi getaran dan 1 *body mass ring* guna mengetahui desain DVA tidak menyentuh spesimen benda kerja saat proses pengeboran.



(a)



(b)

Gambar 3. 31 *Solution frequency response deformation pada ujung insert (a) dan pada DVA (b)*

3. *Post-processing*

Pada tahapan ini dilakukan pengolahan data pada hasil yang didapat dari *Modal* dan *Harmonic Response Ansys Workbench* dan di plot pada *Microsoft excel* dan *Matlab* untuk mendapatkan grafik *frequency domain* sistem utama tanpa DVA, grafik *frequency domain*

sistem utama dengan DVA, grafik presentase reduksi respon getaran sistem utama dengan DVA.

3.2.10 Reduksi Respon Getaran

Setelah dilakukan proses simulasi, maka akan didapatkan nilai reduksi respon getaran sistem utama yang kemudian akan dibentuk grafik reduksi respon getaran DVA terhadap regular *boring bar* dan *customized boring bar*, respon gerak mass ring guna membukikan desain aman, DVA yang dapat mereduksi hingga batas stabil yang telah ditentukan dan bode diagram dengan grafik deformasi dan frekuensi masing-masing pada sumbu x, y, dan z.

3.2.11 Analisis Data dan Pembahasan

Hasil simulasi yang didapat kemudian akan dianalisis dan dibahas sesuai dasar teori yang ada. Dari analisis data dan pembahsasan yang dilakukan, diketahui variable-variabel yang mempengaruhi reduksi repon getaran pada sistem utama yakni *boring bar* pada proses 49 pengeboran di mesin bubut. Data hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan penelitian terdahulu mengenai eksperimen reduksi getaran pada *boring bar* oleh (Sun, Beibei; Li, Lie; , 2019) dan (Liu, Liu, & Wu, 2018) sebagai validasi hasil penelitian. Analisis dan pembahasan tersebut nantinya akan digunakan sebagai acuan untuk menarik kesimpulan dari penelitian ini.

3.2.12 Kesimpulan

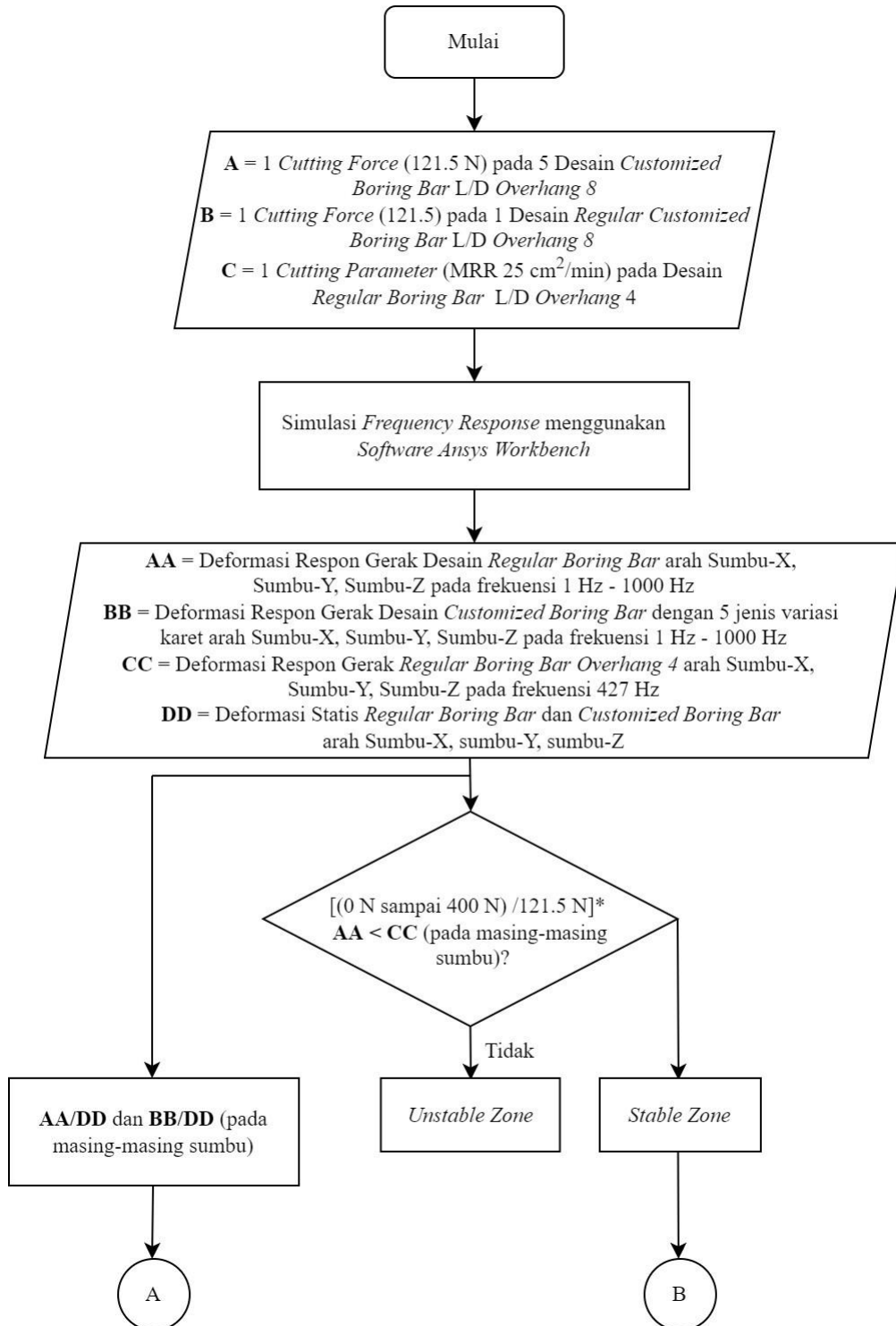
Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini. Kesimpulan yang ditulis berupa pokok bahasan dan menjawab rumusan masalah yang telah dituliskan pada bab I sehingga tujuan dari penelitian tercapai. Kemudian akan dibuat saran untuk penelitian selanjutnya agar mendapatkan hasil yang lebih baik. (Okonkwo et al., 2017)

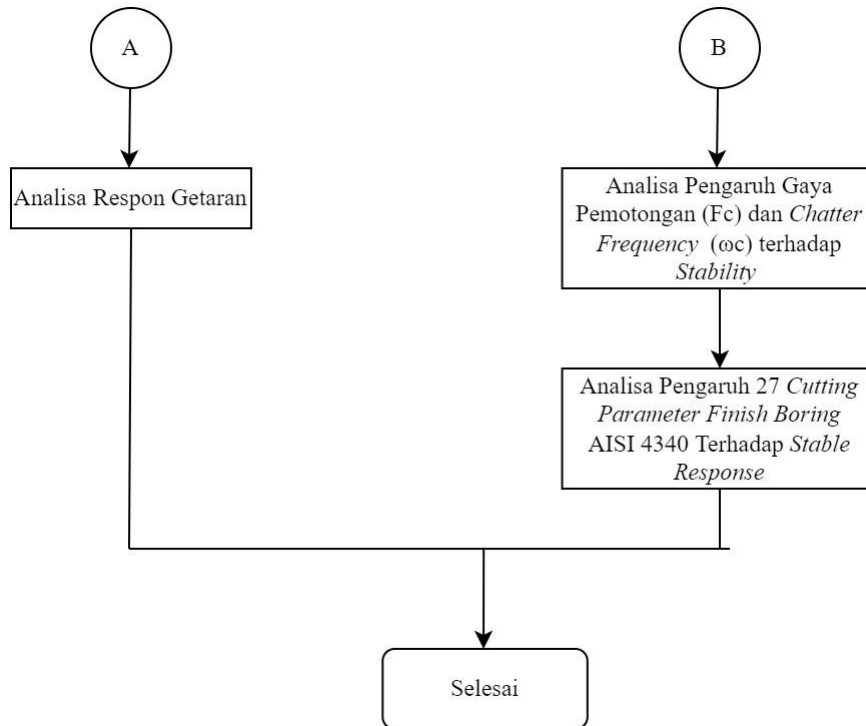
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 *Flowchart Analisis Data*

Adapun langkah-langkah pengolahan data pada penelitian ini dilakukan seperti yang ditunjukkan pada *flowchart* analisis data dan pembahasan pada gambar berikut.





Gambar 4. 1 *Flowchart Data Analysis*

4.2 Analisis Respon Getaran

Pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan *Software Ansys Workbench Modal* dan *Harmonic Response Analysis* dengan memasukkan input *engineering data*, model geometri, dan variasi kekakuan karet yang tertera pada bab sebelumnya. Model geometri tersebut diberikan gaya eksitasi, *meshing*, *connection*, dan pemberian gaya serta *fixed support* pada model sistem. Simulasi yang telah dilakukan tersebut menghasilkan *output deformation frequency response* pada *insert* dengan arah berupa x, y, z di masing-masing geometri dan variasi. Data yang dihasilkan dari simulasi kemudian diolah menggunakan *Microsoft excel* dengan membagi semua respon data yang didapat dengan defleksi statis *regular boring bar* sehingga dihasilkan nilai rasio amplitudo arah axial ($\frac{X}{X_{st}}$), arah tangensial ($\frac{Y}{Y_{st}}$), dan arah radial ($\frac{Z}{Z_{st}}$). Data deformasi respon gerak sistem utama dengan penambahan DVA pada *range* frekuensi 100 Hz – 800 Hz pada masing-masing geometri. Dari hasil olah data pada *Microsoft Excel* didapat *dimensionless frequency response* yang kemudian di plot menjadi *bode diagram* dan grafik 3D *plot* respon gerak terhadap gaya pemotongan dan *chatter frequency* yang diberikan *stability limit* untuk membuktikan bahwa variasi *boring bar* yang dirancang dapat bekerja pada zona aman.

4.2.1. Analisa Frekuensi Natural pada Seluruh Variasi Boring Bar

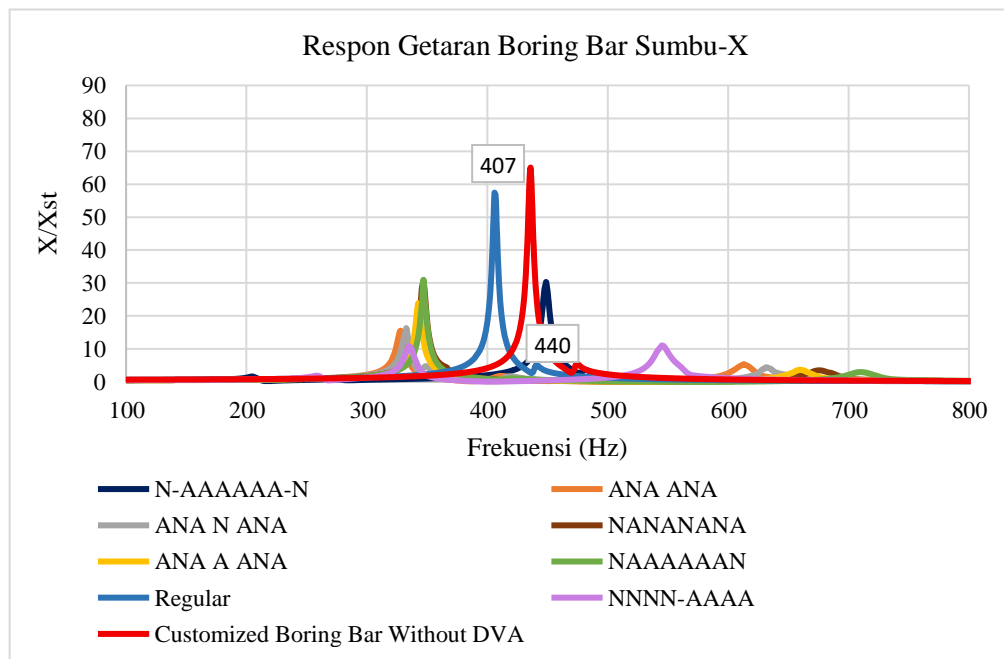
Tabel 4. 1 Natural Frequency Data of Customized Boring Bar DVA ANA N ANA for Each Mode Shape

Variasi Boring Bar	Mode							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Regular	225.15	290.45	331.77	407.06	450.68	530.98	618.74	789.45
DVA ANA ANA	257.42	332.75	347.99	409.25	417.91	631.98	642.74	879.24
DVA ANA N ANA	260.35	339.84	350.1	411.01	421.26	634.63	645.28	884.57
DVA ANA A ANA	271.37	342.55	353.78	414.5	425.77	637.45	648.62	888.21
DVA NANANANA	275.78	345.64	358.24	419.36	429.72	638.34	652.58	892.35
DVA NAAAAAAN	281.18	349.83	361.39	425.76	434.44	647.98	659.02	896.38

Tabel 4.1 diatas merupakan data frekuensi natural yang diperoleh dari hasil simulasi ANSYS modal. Data tersebut nantinya akan digunakan untuk mengetahui frekuensi operasional yang aman digunakan dari tiap variasi boring bar. Tiap variasi boring bar memiliki frekuensi natural yang berbeda, dimana ditunjukkan bahwa semakin banyak karet yang dipasang pada boring bar, maka frekuensi natural yang dihasilkan akan berada pada nilai frekuensi yang semakin besar.

4.2.2. Respon Getaran Boring Bar Arah Sumbu-X (Axial)

Analisis respon getaran pada boring bar dilakukan dengan memberikan gaya eksitasi pada ujung edges pisau pahat. Sistem utama pada penelitian ini adalah regular boring bar dan customized boring bar dengan terdapat 5 variasi karet. Berikut merupakan analisis respon gerak regular boring bar dan customized boring bar arah sumbu-X pada frekuensi 100 Hz – 800 Hz.



Gambar 4. 2 X-Axis of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram

Gambar 4.2 merupakan respon gerak dari regular boring bar dan 5 variasi customized boring bar arah sumbu-X. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa pada regular boring bar memiliki 2 peak frekuensi natural yang berhimpit yaitu antara 407 Hz – 440 Hz, dimana

amplitudo dari *regular boring bar* memiliki nilai yang sangat tinggi apabila dibandingkan dengan seluruh *boring bar* yang sudah dipasang sistem DVA. Selain itu, dapat dilihat juga bahwa ketika sistem berada pada frekuensi natural, *regular boring bar* memiliki puncak rasio perpindahan amplitudo lebih besar daripada seluruh *customized boring bar*. Hal tersebut terjadi karena pada sistem dengan kekakuan yang lebih besar akan memiliki nilai deformasi statis (X_{st}) dan deformasi dinamis (X) yang kecil namun nilai rasio amplitudo (X/X_{st}) akan semakin besar.

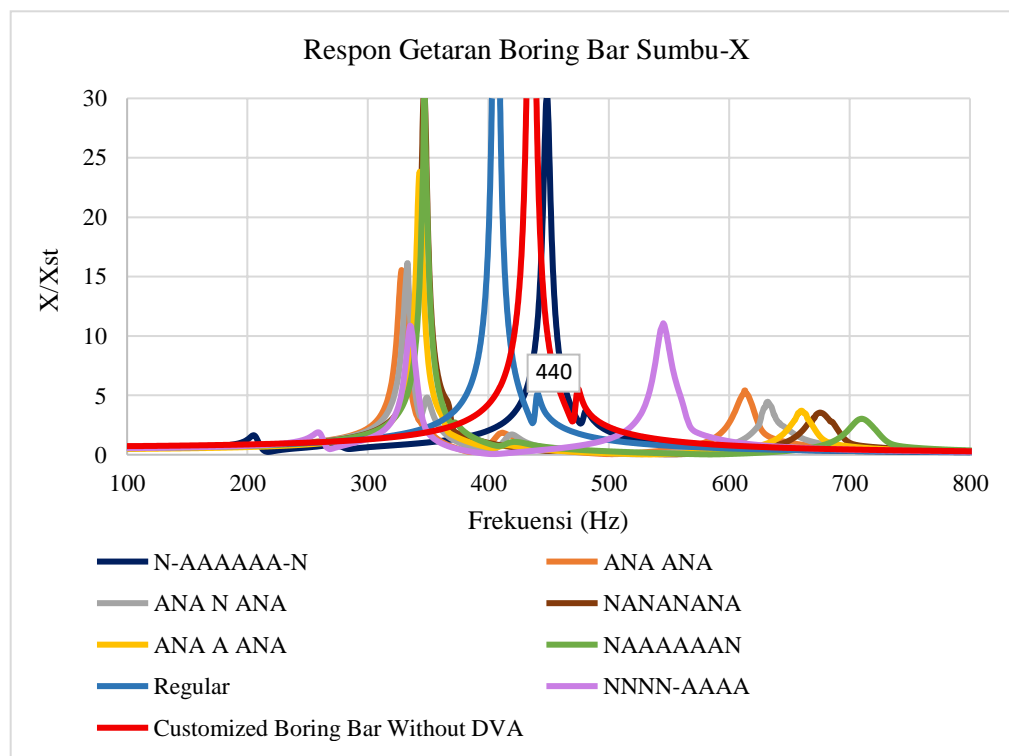
Frekuensi natural pada *regular boring bar* memiliki nilai deformasi dinamis sebesar 0,66211 mm dan nilai deformasi statis sebesar 0,01159 mm. Maka dari itu, didapatkan nilai rasio X/X_{st} sebesar 57,12769 mm. Sama seperti *regular boring bar*, *customized boring bar* tanpa DVA memiliki dua *peak* berhimpit dengan nilai rasio amplitudo paling besar. Hal ini disebabkan karena *customized boring bar* mengalami pengurangan nilai kekakuan, dimana terdapat pengurangan diameter pada ujung *body boring bar* sebagai penempatan DVA. Pada seluruh *customized boring bar*, dapat dilihat bahwa grafik sistem memiliki 2 frekuensi natural yang mana seiring bertambahnya karet maka *tren* akan semakin bergeser ke kanan. Pada *tren peak* pertama dapat dilihat bahwa amplitudo akan semakin naik dan *tren* pada *peak* kedua amplitudo akan semakin menurun. Hal ini sesuai dengan teori dan penelitian yang telah dilakukan oleh (Sun, Beibei; Li, Lie, 2019) dan (Liu, Liu, & Wu, 2018) dimana semakin besar kekakuan DVA maka amplitudo *peak* pertama akan semakin meningkat dan amplitudo *peak* kedua akan semakin menurun hingga menghilang dan sistem kembali menjadi 1-DOF.

Pada setiap *customized boring bar* memiliki daerah redaman yang berbeda-beda, diantaranya yaitu variasi ANA ANA memiliki daerah redaman dengan *range* frekuensi operasional 329 Hz hingga 618 Hz, variasi ANA N ANA memiliki daerah redaman dengan *range* 333 Hz hingga 630 Hz, variasi ANA A ANA memiliki daerah redaman dengan *range* 343 Hz hingga 659 Hz, variasi NANANANA memiliki daerah redaman dengan *range* 347 Hz hingga 672 Hz, dan variasi NAAAAAAN 347 Hz hingga 707 Hz. Hasil ini sesuai dengan teori yaitu bertambahnya nilai konstanta kekakuan DVA menyebabkan daerah redaman menjadi semakin lebar. Kemudian pada penelitian ini dilakukan simulasi kembali terhadap variasi kombinasi karet lainnya yaitu *customized boring bar* DVA NNNN-AAAA dan DVA N-AAAAAA-N yang dikomparasi dengan DVA NANANANA dan DVA NAAAAAAN guna mengetahui pengaruh susunan karet yang dijadikan satu kesatuan karet tersebut terhadap respon getaran. *Customized boring bar* dengan DVA N-AAAAAA-N ditunjukkan dengan warna hitam dan DVA NNNN-AAAA ditunjukkan dengan warna ungu. DVA N-AAAAAA-N memiliki satu puncak dengan rasio amplitudo 27.89657, sedangkan DVA NNNN-AAAA memiliki dua puncak yang mana responnya cukup berbeda dengan *customized boring bar* lainnya. Hal ini disebabkan karena susunan karet DVA N-AAAAAA-N dan DVA NNNN-AAAA memiliki modus getar yang berbeda dengan DVA NANANANA dan DVA NAAAAAAN yang mana hal ini akan mempengaruhi respon getar yang terjadi.

Tabel 4. 2 The Frequency of The Damping Area of The Boring Bar in The Axial Direction

No	Variasi Karet	Arah Sumbu Axial			
		Range (Hz)	Lebar (Hz)	Amplitude Ratio Tertinggi (mm)	Amplitude Ratio Terendah (mm)
1	Regular	407-440	33	57.127	4.289
2	Customized without DVA	436-478	42	65.099	4.101
3	ANA ANA	329 – 618	289	14.811	4.195
4	ANA N ANA	333 – 630	297	16.132	4.064
5	ANA A ANA	343 – 659	316	21.902	3.067
6	NANANANA	347 – 672	325	29.668	3.327
7	NAAAAAAN	347 - 707	360	31.018	2.704
8	N-AAAAAA-N	450-486	36	27.896	3.076
9	NNNN-AAAA	338-549	211	10.484	9.610

Tabel diatas merupakan data frekuensi operasional *boring bar* pada arah *axial*. Terdapat beberapa data yang didapatkan, diantaranya yaitu data *range* dari frekuensi operasional (Hz). *Range* tersebut merupakan daerah stabil yang dapat digunakan dari tiap variasi *boring bar* karena pada *range* tersebut *boring bar* memiliki nilai rasio amplitude yang lebih rendah dari *regular boring bar*, dimana nilai tersebut menunjukkan terjadinya reduksi getaran yang dihasilkan oleh *customized boring bar*. Selanjutnya, terdapat data rasio amplitudo (mm) yang menunjukkan bahwa semakin kaku *boring bar*, maka tren dari amplitudo akan semakin naik dan tren akan semakin menurun pada *peak* kedua. Pada arah axial didapatkan variasi DVA NAAAAAAN merupakan variasi yang paling mereduksi diantara variasi lainnya.

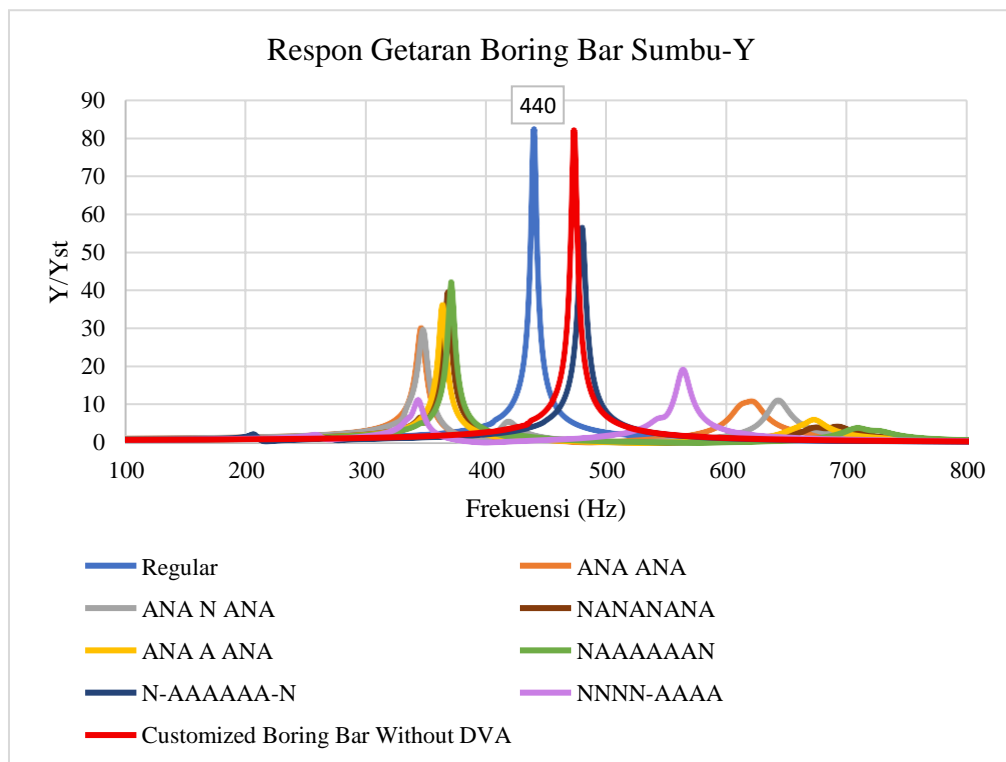


Gambar 4. 3 X-Axis Zoom in View of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram

Gambar 4.3 diatas merupakan *bode diagram* sumbu-X *regular* dan *customized boring bar* setelah diperbesar. *Bode diagram* tersebut menunjukkan bahwa seluruh variasi *customized* memiliki *middle peak* pada rentang frekuensi 400-420 Hz. Salah satu variasi *customized boring bar* yang terdapat *middle peak* yaitu pada *customized boring bar* ANA N ANA. Pada *bode diagram* tersebut ditunjukkan bahwa pada variasi tersebut terdapat *middle peak* pada frekuensi natural (ω_n) 411 Hz yang mana nilai frekuensi natural tersebut ditunjukkan melalui simulasi ANSYS *modal* seperti pada tabel 4.1 diatas. Simulasi ANSYS *modal* yang dilakukan berbeda dengan simulasi ANSYS *modal* pada penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini, *max modes to find* pada menu *analysis settings* ANSYS *modal* di-*set* hingga 8, sedangkan pada penelitian sebelumnya di-*set default* atau 6. Maka dari itu, modus getar yang didapatkan lebih rinci hingga mendapatkan 8 pola frekuensi natural yang terjadi pada sistem dan menghasilkan pola baru yang tidak dimunculkan pada penelitian sebelumnya. Berdasarkan data pada *bode diagram*, *middle peak* yang terjadi merupakan salah satu pola baru yang ditimbulkan akibat *max modes to find* yang di-*set*, yaitu berada pada frekuensi *chatter* (ω) 411 Hz, dimana nilai tersebut sama dengan frekuensi natural (ω_n) yang ditunjukkan pada tabel simulasi ANSYS *modal* diatas yaitu pada 411 Hz. Kondisi ini dapat disimpulkan bahwa terjadi resonansi pada frekuensi 411 Hz, dimana $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$.

4.2.3. Respon Getaran Boring Bar Arah Sumbu-Y (Tangensial)

Analisis respon gerak *regular boring bar* dan 5 variasi DVA *customized boring bar* arah sumbu-Y pada frekuensi 100 Hz – 800 Hz.



Gambar 4. 4 *Y-Axis of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram*

Berdasarkan hasil simulasi *harmonic response* yang kemudian di plot pada *bode diagram* seperti pada gambar 4.4 tersebut menunjukkan bahwa *regular boring bar* hanya memiliki satu frekuensi natural dan *customized boring bar* memiliki 2 frekuensi natural, sama seperti arah sumbu-X. Hal tersebut terjadi karena semakin besar kekakuan DVA, maka amplitudo pada *peak* pertama akan semakin meningkat dan amplitudo *peak* kedua akan semakin menurun hingga menghilang dan sistem kembali menjadi 1-DOF. Kemudian sama seperti *regular boring bar* pada sumbu-x, *customized boring bar* tanpa DVA memiliki dua *peak* berhimpit dengan nilai rasio amplitudo yang sama dengan *regular boring bar*. Pada *bode diagram* gambar 4.4, *boring bar* dengan variasi ANA ANA memiliki nilai rasio amplitudo *peak* pertama yang paling kecil dibandingkan dengan *peak* pertama dari seluruh variasi *boring bar* lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah karet mempengaruhi nilai kekakuan dari *boring bar*. Artinya, semakin banyak karet maka nilai kekakuan akan semakin besar dan menyebabkan *tren* pada *peak* pertama semakin naik dan *peak* kedua akan semakin menurun.

Peak regular boring bar berada pada frekuensi natural 407 Hz, yang mana frekuensi natural tersebut memiliki nilai yang sama dengan frekuensi natural arah sumbu-X pada *peak* kedua (*additional peak*). Hal ini disebabkan karena sumbu-X merupakan *secondary movement* yang mana gerakannya bergantung pada gaya arah sumbu-Y dan sumbu-Z. Nilai puncak dari *bode diagram* sumbu-Y cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan sumbu-X. Hal tersebut dikarenakan ketika proses *boring* gaya yang diberikan pada arah *axial* (sumbu-X) pengaruhnya tidak terlalu signifikan dibandingkan arah *tangential* (sumbu-Y).

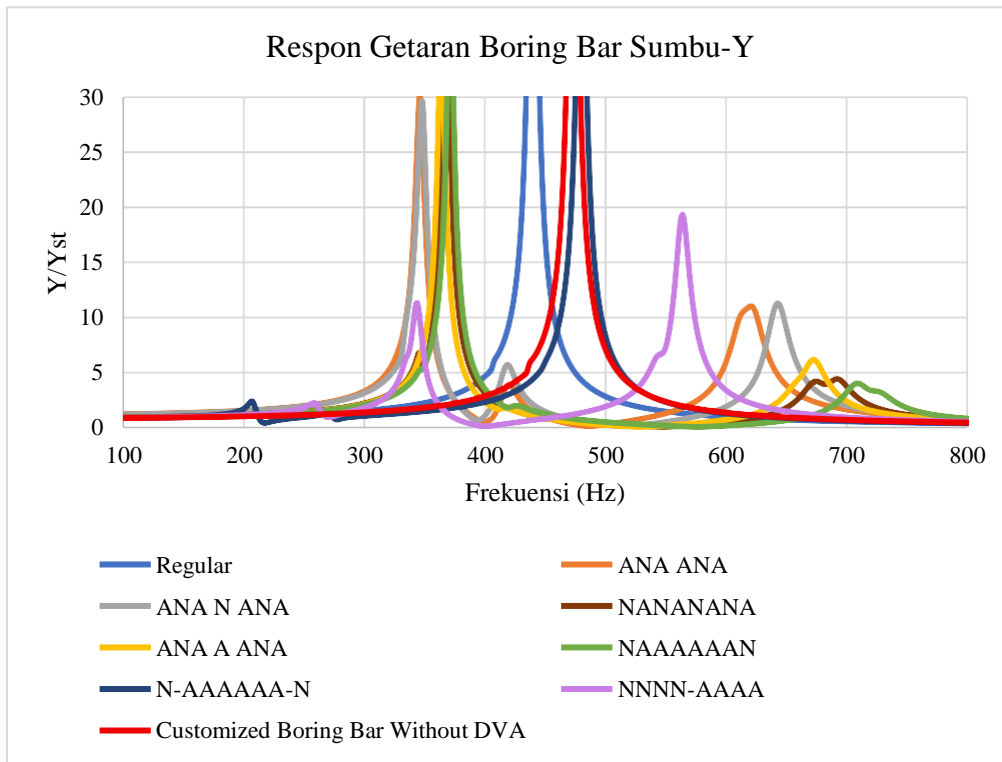
Pada setiap *customized boring bar* memiliki daerah redaman yang berbeda-beda, diantaranya yaitu variasi ANA ANA memiliki daerah redaman dengan *range* frekuensi operasional 345 Hz hingga 618 Hz, variasi ANA N ANA memiliki daerah redaman dengan *range* 347 Hz hingga 648 Hz, variasi ANA A ANA memiliki daerah redaman dengan *range* 363 Hz hingga 670 Hz, variasi NANANANA memiliki daerah redaman dengan *range* 368 Hz hingga 681 Hz, dan variasi NAAAAAAN 372 Hz hingga 706 Hz. Hasil ini sesuai dengan teori yaitu bertambahnya nilai konstanta kekakuan DVA menyebabkan daerah redaman menjadi semakin lebar.

Tabel 4. 3 *The Frequency of The Damping Area of The Boring Bar in The Tangential Direction*

No	Variasi Karet	Arah Sumbu Tangential			
		Range (Hz)	Lebar (Hz)	Amplitude Ratio Tertinggi (mm)	Amplitude Ratio Terendah (mm)
1	<i>Regular</i>	407 - 440	33	82.439	5.209
2	<i>Customized without DVA</i>	431 - 474	43	79.013	5.114
3	ANA ANA	345 – 618	273	29.279	9.078
4	ANA N ANA	347 – 648	301	29.678	10.884
5	ANA A ANA	363 – 670	307	33.683	5.482
6	NANANANA	368 – 681	313	39.389	4.293
7	NAAAAAAN	372 - 706	334	40.204	3.603
8	N-AAAAAA-N	385 - 479	94	54.658	2.359
9	NNNN-AAAA	341 - 566	225	17.445	8.781

Tabel diatas merupakan data frekuensi operasional *boring bar* pada arah *tangential*. Terdapat beberapa data yang didapatkan, diantaranya yaitu data *range* dari frekuensi operasional

(Hz). *Range* tersebut merupakan daerah stabil yang dapat digunakan dari tiap variasi *boring bar* karena pada *range* tersebut *boring bar* memiliki nilai rasio amplitude yang lebih rendah dari *regular boring bar*, dimana nilai tersebut menunjukkan terjadinya reduksi getaran yang dihasilkan oleh *customized boring bar*. Selanjutnya, terdapat data rasio amplitudo (mm) yang menunjukkan bahwa semakin kaku *boring bar*, maka tren dari amplitudo akan semakin naik dan tren akan semakin menurun pada *peak* kedua. Pada arah axial didapatkan variasi DVA NAAAAAAN merupakan variasi yang paling mereduksi diantara variasi lainnya.



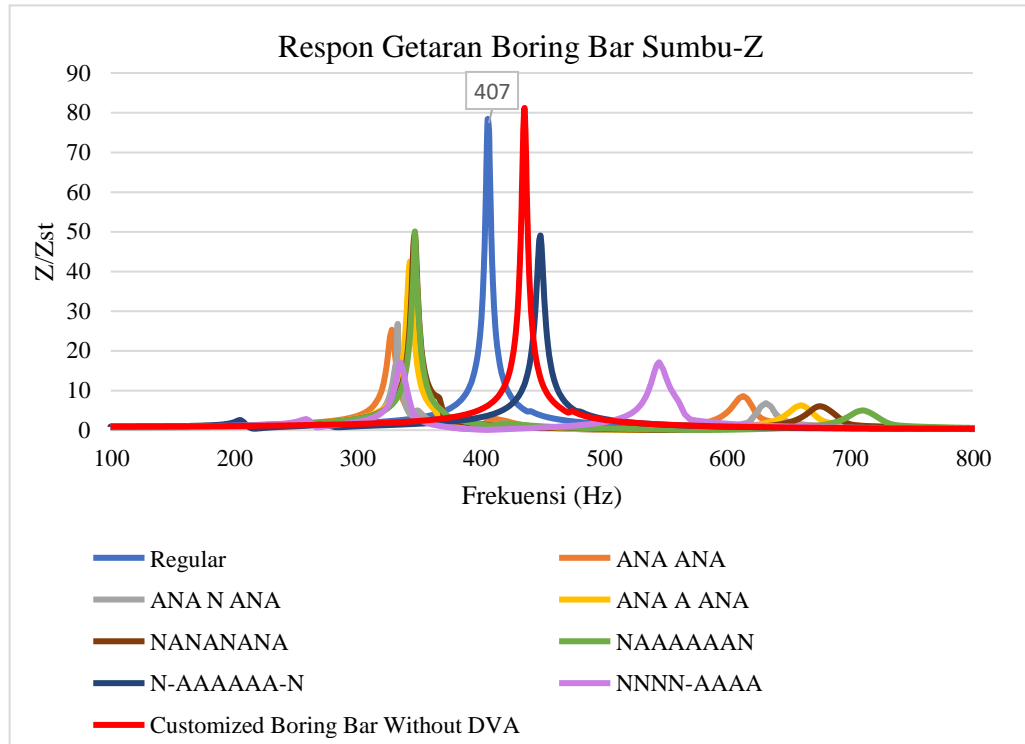
Gambar 4.5 Y-Axis Zoom in View of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram

Gambar 4.5 diatas merupakan *bode diagram* sumbu-Y *regular* dan *customized boring bar* setelah diperbesar. *Bode diagram* tersebut menunjukkan bahwa seluruh variasi *customized boring bar* memiliki *middle peak* pada rentang frekuensi 340-420 Hz. Salah satu variasi *customized boring bar* yang terdapat *middle peak* yaitu pada *customized boring bar* ANA N ANA. Pada *bode diagram* tersebut ditunjukkan bahwa pada variasi tersebut terdapat *middle peak* pada frekuensi natural (ω_n) 411 Hz yang mana nilai frekuensi natural tersebut ditunjukkan melalui simulasi ANSYS *modal* seperti pada tabel 4.1 diatas yang mana hal tersebut terjadi karena adanya resonansi, sama halnya pada *bode diagram* sumbu-Y dan sumbu-Z. Simulasi ANSYS *modal* yang dilakukan berbeda dengan simulasi ANSYS *modal* pada penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini, *max modes to find* pada menu *analysis settings* ANSYS *modal* di-set hingga 8, sedangkan pada penelitian sebelumnya di-set *default* atau 6. Maka dari itu, modus getar yang didapatkan lebih rinci hingga mendapatkan 8 pola frekuensi natural yang terjadi pada sistem dan menghasilkan pola baru yang tidak dimunculkan pada penelitian sebelumnya. Berdasarkan data pada *bode diagram*, *middle peak* yang terjadi merupakan salah satu pola baru yang ditimbulkan akibat *max modes to find* yang di-set, yaitu berada pada frekuensi *chatter* (ω) 411 Hz, dimana nilai tersebut sama dengan frekuensi natural (ω_n) yang ditunjukkan pada tabel

simulasi ANSYS *modal* diatas yaitu pada 411 Hz. Kondisi ini dapat disimpulkan bahwa terjadi resonansi pada frekuensi 411 Hz, dimana $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$.

4.2.4. Respon Getaran Boring Bar Arah Sumbu-Z (Radial)

Analisis respon gerak *regular boring bar* dan 5 variasi DVA *customized boring bar* arah sumbu-Z pada frekuensi 100 Hz – 800 Hz.



Gambar 4. 6 Z-Axis of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram

Pada gambar 4.6 diatas merupakan respon gerak arah sumbu-Z dari *regular boring bar* dan 5 variasi *customized boring bar*. Sama halnya dengan respon gerak pada sumbu-X dan sumbu-Y, *regular boring bar* memiliki rasio amplitudo maximum dengan satu puncak pada frekuensi eksitasi 407 Hz. Nilai frekuensi eksitasi pada *regular boring bar* tersebut mendekati nilai dari frekuensi natural pada sistem yang didapatkan dari simulasi ANSYS *modal* yaitu 411 Hz. Menurut (Sun, Beibei; Li, Lie.; 2019), ketika nilai frekuensi eksitasi mendekati nilai frekuensi natural maka hal tersebut menyebabkan resonansi. Berbeda halnya dengan seluruh *customized boring bar*, dimana seluruh *customized boring bar* menjadi sistem *two degree of freedom* dengan memiliki dua puncak. Seperti yang dapat dilihat bahwa resonansi yang terjadi pada *regular boring bar* dapat diredam dengan *customized boring bar*. Hal tersebut ditunjukkan pada titik resonansi *regular boring bar* yang berada diantara dua puncak *customized boring bar*. Nilai puncak dari *bode diagram* sumbu-Z (*radial*) hampir mendekati nilai dari puncak pada sumbu-Y (*tangential*). Hal tersebut dikarenakan ketika proses *boring* gaya pada arah tangential dan radial memiliki pengaruh yang signifikan. Kesimpulan pada grafik diatas adalah respon perpindahan getaran sistem utama setelah penambahan DVA di semua variasi kombinasi karet DVA lebih kecil dibandingkan sebelum penambahan DVA.

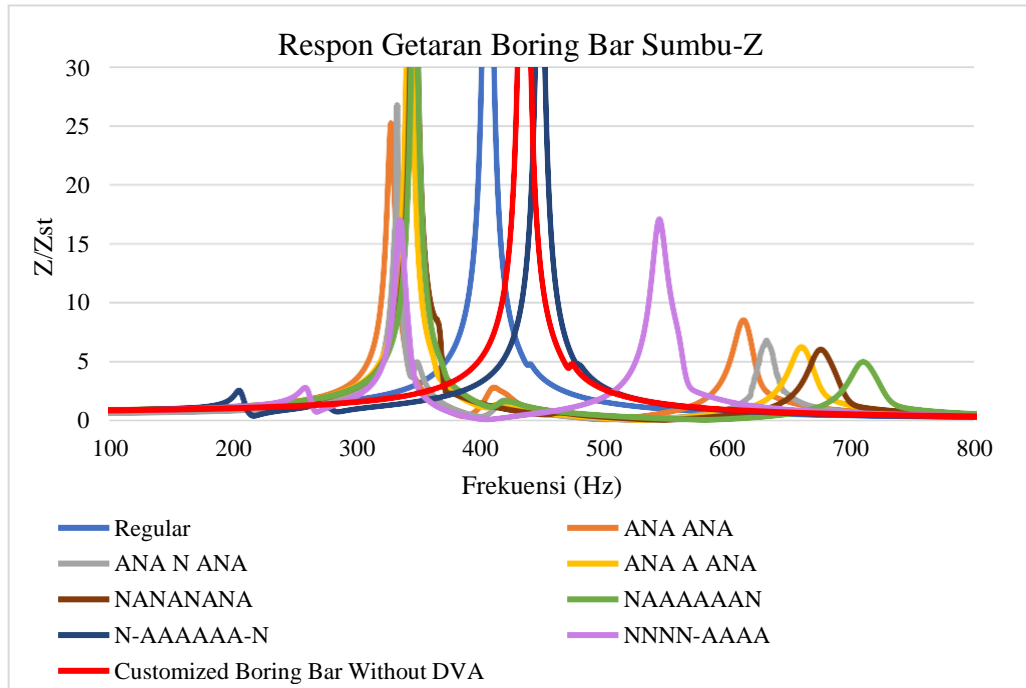
Berdasarkan *bode diagram* diatas bahwa *peak* pada *regular boring bar* berada pada frekuensi 405 Hz, yang mana frekuensi tersebut memiliki nilai yang sama dengan frekuensi natural pada *peak* pertama pada *regular boring bar*. Hal ini sesuai dengan penjelasan

sebelumnya bahwa memang sumbu-X merupakan *secondary movement*. Pada setiap *customized boring bar* memiliki daerah redaman yang berbeda-beda, diantaranya yaitu variasi ANA ANA memiliki daerah redaman dengan *range* frekuensi operasional 330 Hz hingga 613 Hz, variasi ANA N ANA memiliki daerah redaman dengan *range* 345 Hz hingga 632 Hz, variasi ANA A ANA memiliki daerah redaman dengan *range* 355 Hz hingga 663 Hz, variasi NANANANA memiliki daerah redaman dengan *range* 365 Hz hingga 680 Hz, dan variasi NAAAAAAN 385 Hz hingga 714 Hz. Hasil ini sesuai dengan teori yaitu bertambahnya nilai konstanta kekakuan DVA menyebabkan daerah redaman menjadi semakin lebar.

Tabel 4. 4 *The Frequency of The Damping Area of The Boring Bar in The Radial Direction*

No	Variasi Karet	Arah Sumbu Radial			
		Range (Hz)	Lebar (Hz)	Amplitude Ratio Tertinggi (mm)	Amplitude Ratio Terendah (mm)
1	<i>Regular</i>	407-440	33	78.363	4.768
2	<i>Customized without DVA</i>	436-480	44	81.204	4.08
3	ANA ANA	330 – 613	283	24.02	8.227
4	ANA N ANA	345 – 632	287	26.788	5.935
5	ANA A ANA	355 – 663	308	40.223	5.156
6	NANANANA	365 – 680	320	47.678	4.898
7	NAAAAAAN	385 – 714	339	50.077	4.841
8	N-AAAAAA-N	209 - 448	239	49.061	4.193
9	NNNN-AAAA	333 - 545	212	16.892	16.142

Tabel diatas merupakan data frekuensi operasional *boring bar* pada arah *radial*. Terdapat beberapa data yang didapatkan, diataranya yaitu data *range* dari frekuensi operasional (Hz). *Range* tersebut merupakan daerah stabil yang dapat digunakan dari tiap variasi *boring bar* karena pada *range* tersebut *boring bar* memiliki nilai rasio amplitude yang lebih rendah dari *regular boring bar*, dimana nilai tersebut menunjukkan terjadinya reduksi getaran yang dihasilkan oleh *customized boring bar*. Selanjutnya, terdapat data rasio amplitudo (mm) yang menunjukkan bahwa semakin kaku *boring bar*, maka tren dari amplitudo akan semakin naik dan tren akan semakin menurun pada *peak* kedua. Pada arah axial didapatkan variasi DVA NAAAAAAN merupakan variasi yang paling mereduksi diantara variasi lainnya.

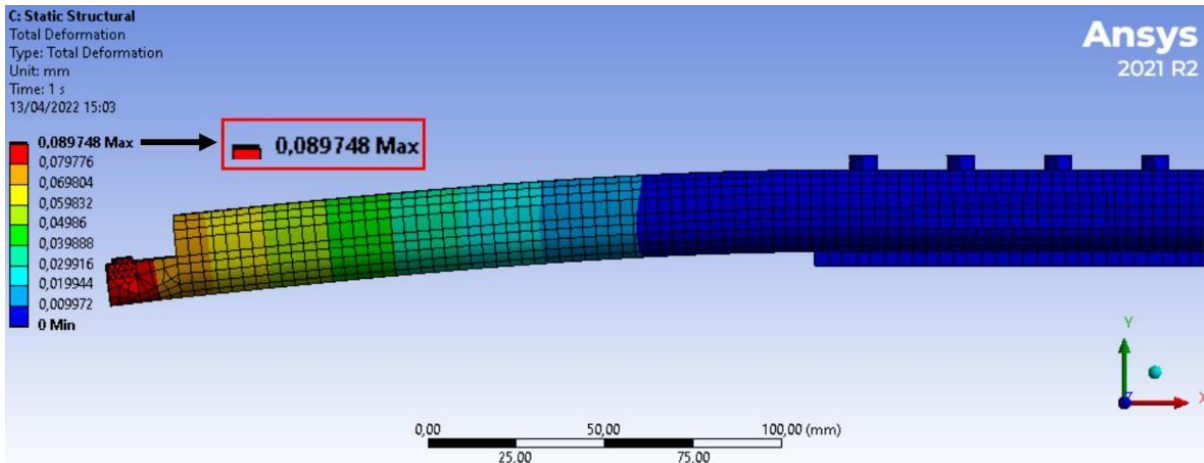


Gambar 4. 7 Z-Axis Zoom in View of Regular Boring Bar and Customized Boring Bar Bode Diagram

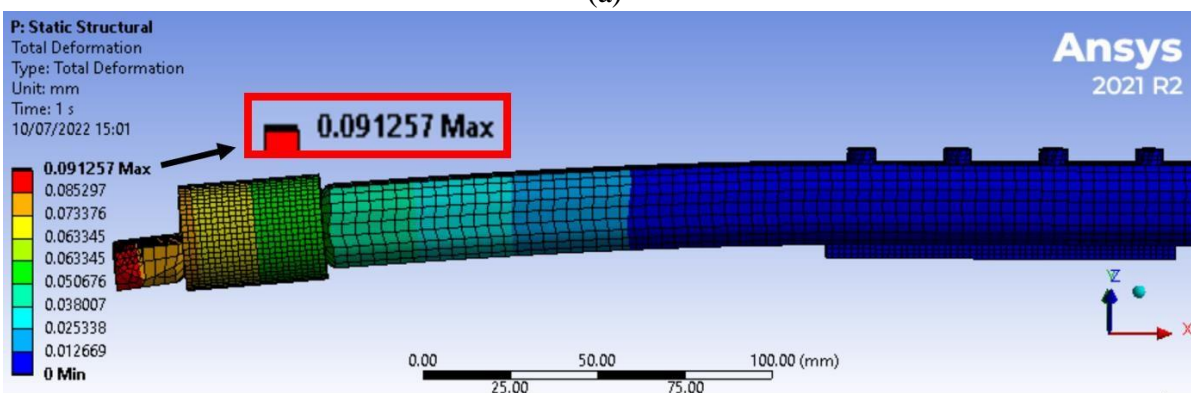
Gambar 4.7 diatas merupakan *bode diagram* sumbu-Z *regular* dan *customized boring bar* setelah diperbesar. *Bode diagram* tersebut menunjukkan bahwa seluruh variasi *customized boring bar* memiliki *middle peak* pada rentang frekuensi 340-420 Hz. Salah satu variasi *customized boring bar* yang terdapat *middle peak* yaitu pada *customized boring bar* ANA N ANA. Pada *bode diagram* tersebut ditunjukkan bahwa pada variasi tersebut terdapat *middle peak* pada frekuensi natural (ω_n) 411 Hz yang mana nilai frekuensi natural tersebut ditunjukkan melalui simulasi ANSYS *modal* seperti pada tabel 4.1 diatas yang mana hal tersebut terjadi karena adanya resonansi, sama halnya pada *bode diagram* sumbu-X dan sumbu-Y. Simulasi ANSYS *modal* yang dilakukan berbeda dengan simulasi ANSYS *modal* pada penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini, *max modes to find* pada menu *analysis settings* ANSYS *modal* di-set hingga 8, sedangkan pada penelitian sebelumnya di-set *default* atau 6. Maka dari itu, modus getar yang didapatkan lebih rinci hingga mendapatkan 8 pola frekuensi natural yang terjadi pada sistem dan menghasilkan pola baru yang tidak dimunculkan pada penelitian sebelumnya. Berdasarkan data pada *bode diagram*, *middle peak* yang terjadi merupakan salah satu pola baru yang ditimbulkan akibat *max modes to find* yang di-set, yaitu berada pada frekuensi *chatter* (ω) 411 Hz, dimana nilai tersebut sama dengan frekuensi natural (ω_n) yang ditunjukkan pada tabel simulasi ANSYS *modal* diatas yaitu pada 411 Hz. Kondisi ini dapat disimpulkan bahwa terjadi resonansi pada frekuensi 411 Hz, dimana $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$.

4.2.5. Perbandingan Deformasi Regular Boring Bar dan Customized Boring Bar

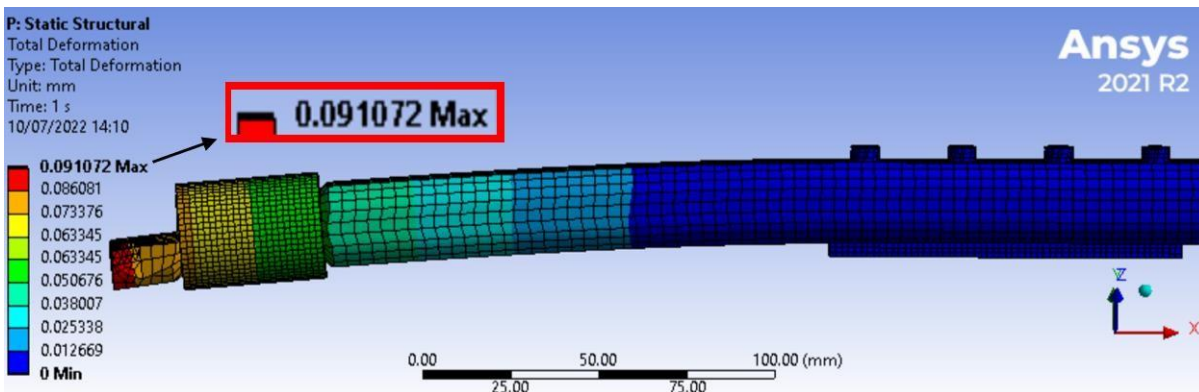
Analisa deformasi dilakukan dengan membandingkan nilai deformasi dan kontur warna pada *regular boring bar* dan *customized boring bar* pada untuk tiap variasi jenis karet yakni *natural rubber* dan *neoprene rubber*. Diberikan contoh gaya eksitasi yang didapatkan dari *cutting parameter* sebesar 47,16 arah sumbu-X, -121,5 N arah sumbu-Y, dan -83,83 N arah sumbu-Z.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.8 Total deformation simulation for (a) Regular boring bar (b) Customized boring bar with ANA A ANA (c) Customized boring bar with NANANANA

Terlihat bahwa ketika *boring bar* diberikan suatu gaya maka akan menyebabkan *boring bar* tersebut mengalami defleksi. Pada gambar 4.8 *customized boring bar* dengan variasi ANA A ANA memiliki nilai deformasi statis 0,091257 mm, dan pada *customized boring bar* Dengan variasi NANANANA memiliki nilai deformasi statis 0,091072 mm. Berdasarkan nilai deformasi dari tiap-tiap variasi *boring bar*, terlihat bahwa *customized boring bar* memiliki nilai

deformasi yang lebih besar dibandingkan *regular boring bar* pada tiap variasi susunan *rubber DVA boring bar*. Hal tersebut disebabkan karena *customized boring bar* memiliki nilai kekakuan yang lebih kecil dibanding *regular boring bar*. Nilai deformasi *customized boring bar* DVA ANA A ANA dan DVA NANANANA memiliki nilai yang hampir sama dikarenakan kedua material memiliki nilai massa jenis yang hampir serupa. Nilai deformasi yang ditinjau yaitu ketika *boring bar* berada pada kondisi statis. Meskipun nilai deformasi statis yang terjadi pada *customized boring bar* lebih besar dibandingkan dengan *regular boring bar*, nilai tersebut bukanlah nilai yang dijadikan acuan apakah *boring bar* berhasil meredam getaran atau tidak. Menurut teori *non-dimensional analysis*, reduksi getaran dapat ditinjau melalui rasio amplitudo antara deformasi dinamis dengan deformasi statis. Reduksi getaran tersebut dapat dilihat melalui *bode diagram* diatas.

4.3. Analisis Pengaruh Gaya Pemotongan (F_c) dan *Chatter Frequency* (ω_c) Terhadap *Stability*

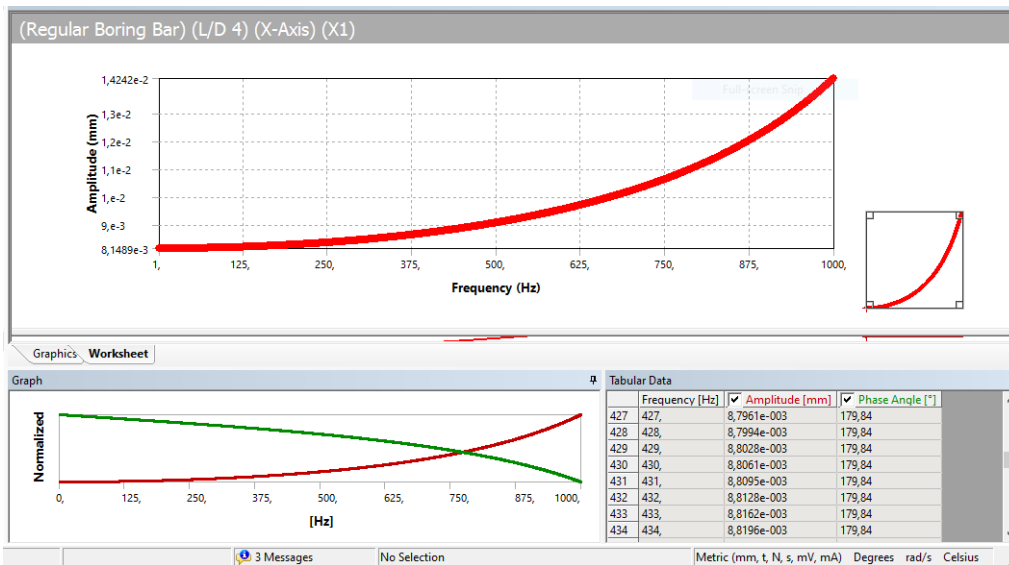
Pada proses *boring* terdapat berbagai macam *cutting parameter* yang mempengaruhi kualitas hasil pengeboran, diantara lain yakni diameter dalam spesimen (D_i), *specific energy* material spesimen (K_c), putaran *spindle* (N), *feedrate* (f), dan *depth of cut* (d). Parameter tersebut yang nantinya akan mempengaruhi besarnya gaya pemotongan (F_c) dan *chatter frequency* (ω_c). Telah ditetapkan 27 *cutting parameter* tipikal *finishing* yang dapat beroperasi dengan stabil pada *boring bar* yang telah dirancang oleh peneliti sebelumnya dengan susunan *rubber-DVA* yaitu satu jenis *neoprene rubber* dan *natural rubber* pada penelitian yang dilakukan oleh (Merdekawan, 2020). Maka dari itu pada penelitian ini, dilakukan analisis untuk membuktikan 27 *cutting parameter* tersebut dapat digunakan pada *boring bar* dengan kombinasi susunan *rubber-DVA*. Digunakan analisis dengan gaya pemotongan (F_c) dan *chatter frequency* (ω_c) yang berbeda-beda. Pada subbab ini akan dianalisis mengenai hubungan antar gaya pemotongan (F_c) dan *chatter frequency* (ω_c) tipikal *finishing* yang digunakan dengan respon gerak dan *stability*.

4.3.1. *Stability Limit*

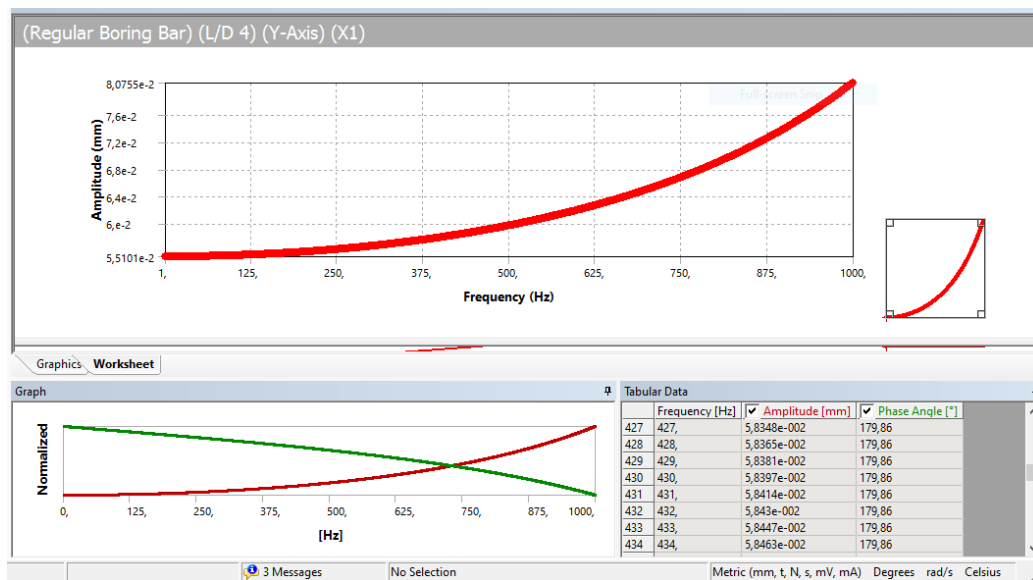
Respon gerak yang dihasilkan tiap variasi kombinasi susunan *rubber-DVA* kemudian diberikan *stability limit* guna menentukan apakah respon gerak dari *boring bar* ada pada zona aman / stabil untuk digunakan. Maka dari itu, dibutuhkan batas dari masing-masing respon gerak *boring bar* arah sumbu-X, sumbu-Y, dan sumbu-Z. Pada penelitian yang dilakukan oleh Sandvik Coromant, dikatakan bahwa *boring bar* dengan $L/D \text{ overhang} = 4$ dapat mampu stabil digunakan pada proses *boring* dengan $MRR = 25 \text{ cm}^2/\text{min}$, oleh karena itu disimulasikan *boring bar* dengan $L/D \text{ overhang} = 4$ pada $MRR = 25 \text{ cm}^2/\text{min}$ oleh (Merdekawan, 2020) dengan *cutting parameter* sebagaimana pada tabel 4.5. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.9 berikut.

Tabel 4.5 *Cutting Parameter of Regular Boring Bar L/D overhang 4*

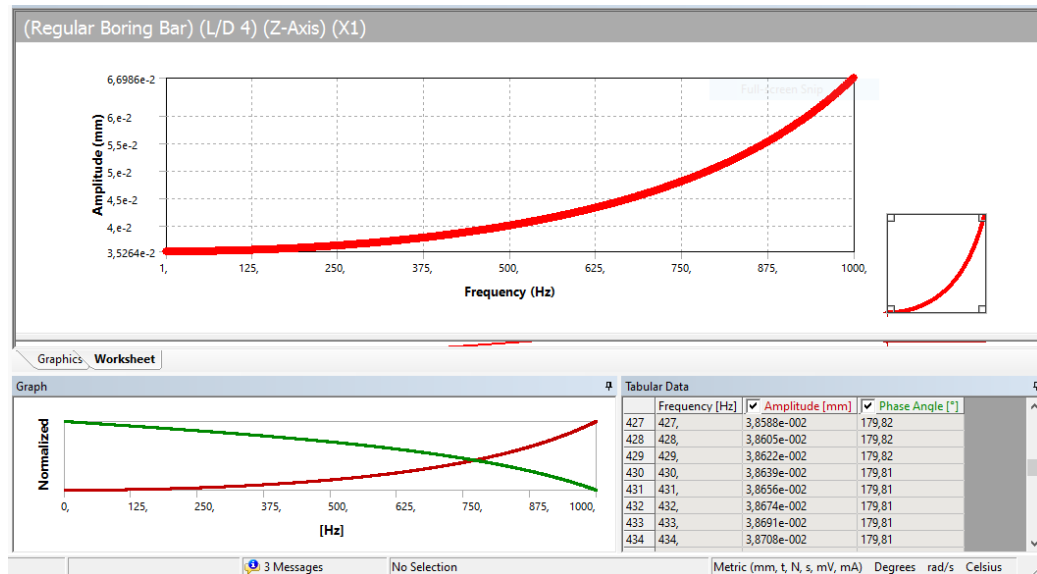
Cutting Parameter					MRR	Cutting Force				Chatter
N (rpm)	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)	Kc (Mpa)		Ft (N)	Fc (N)	Fr (N)	Fm (N)	ω_c (Hz)
2000	251	0,1	1	4050	25,12	154	405	279	516	427



(a)



(b)



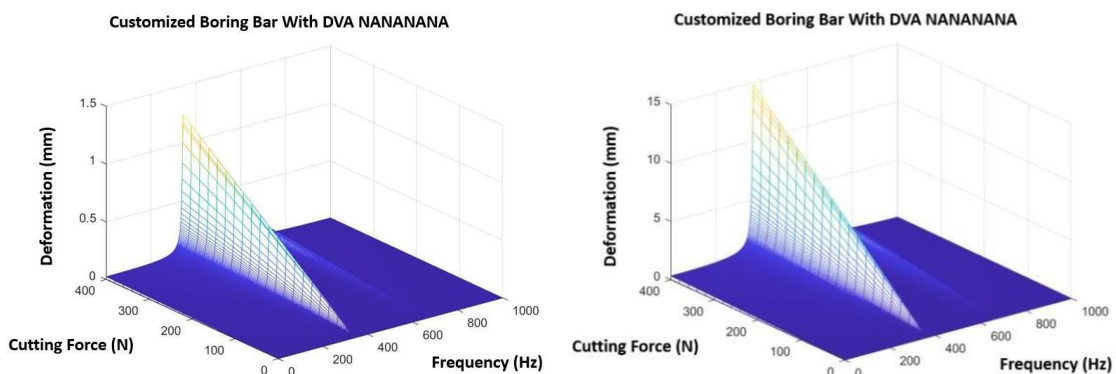
(c)

Gambar 4.9 Motion Response of Regular Boring Bar L/D Overhang 4 on Boring Process with MRR 25 cm²/min Direction (a) X-axis (b) Y-axis (c) Z-axis (Merdekawan, 2020)

Berdasarkan simulasi yang dilakukan oleh (Merdekawan, 2020) didapat respon gerak pada boring bar L/D overhang 4 arah sumbu-X adalah 0,0087961 mm, pada arah sumbu-Y adalah 0,058348 mm, dan pada arah sumbu-Z adalah 0,038588 mm. Nilai inilah yang nantinya akan menjadi batas dikatakannya stabil pada simulasi getaran boring bar dengan L/D overhang 8.

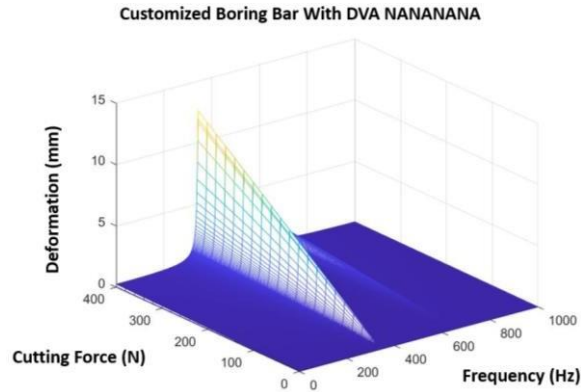
4.3.2. Pengaruh Gaya Pemotongan (Fc) dan Chatter Frequency (ωc) Terhadap Stability limit

Berdasarkan penurunan persamaan respon gerak dari model dinamis sistem, didapatkan bahwa gaya eksitasi berbanding lurus linear dengan amplitudo respon gerak. Berdasarkan hasil simulasi respon gerak deformation (0 Hz – 1000 Hz) dari software Ansys pada cutting force (Fc) = 121.5 N, respon gerak di plot menggunakan software Matlab pada cutting force (Fc) = 0 N – 400 N dengan formula [deformation (mm) 0 Hz – 1000 Hz pada cutting force (Fc) 0 N – 400 N] = [(0 N – 400 N) / 121.5 N] * [deformation (mm) 0 Hz – 1000 Hz pada cutting force (Fc) 121.5 N]. Gambar 4.10 berikut merupakan contoh plot respon gerak customized boring bar dengan DVA NANANANA pada gaya 0 N – 400 N arah sumbu-X, sumbu-Y, sumbu-Z.



(a)

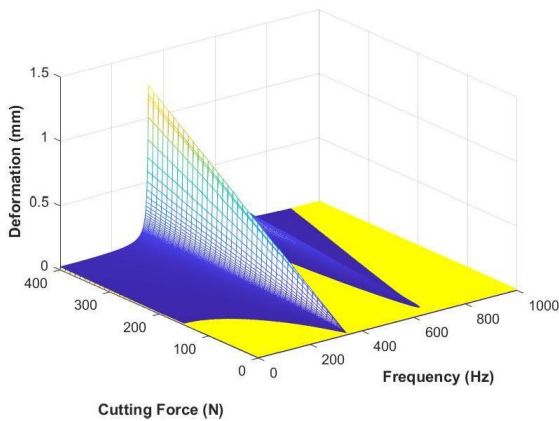
(b)



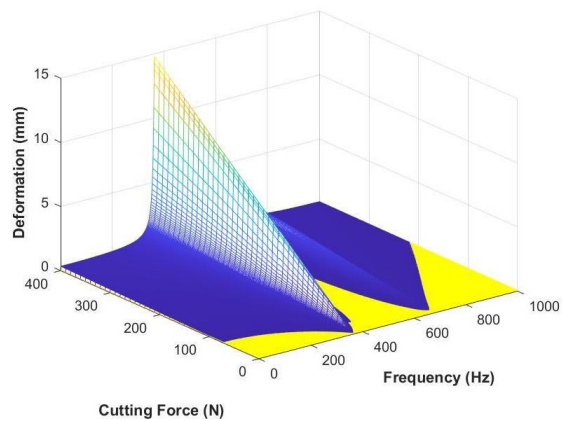
(c)

Gambar 4. 10 3D Plot of Customized Boring Bar Motion Response with DVA NANANANA Direction (a) X-axis, (b) Y-axis, and (c) Z-axis at Cutting Force 0 N – 400 N

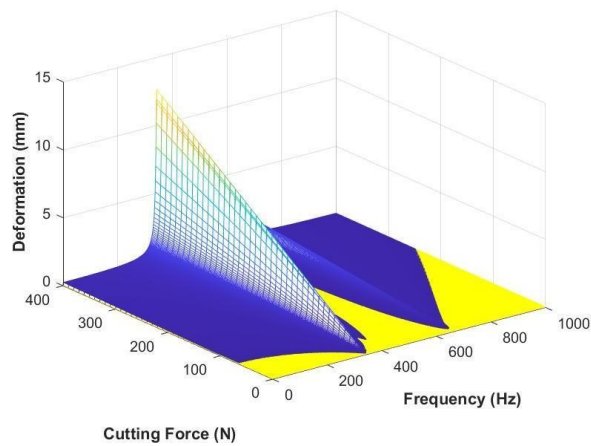
3D plot diatas merupakan hasil *plotting*-an dengan spesifikasi yaitu pada sumbu-X merupakan frekuensi (Hz), sumbu-Y merupakan respon gerak, dan sumbu-Z merupakan *cutting force* (N). *Range* frekuensi tersebut menyesuaikan dengan *range* frekuensi pada *bode diagram* sebelumnya Setelah mendapatkan plot respon gerak *boring bar* pada *cutting force* (F_c) = 0 N – 400 N, kemudian grafik diberi limit sesuai pada subbab *stability limit* yang telah dibahas sebelumnya sebagaimana pada gambar 4.9. Grafik kemudian dipotong guna menyisakan respon gerak *boring bar* dan *mass ring* yang telah memenuhi *stability limit* saja sebagaimana pada gambar 4.11.



(a)



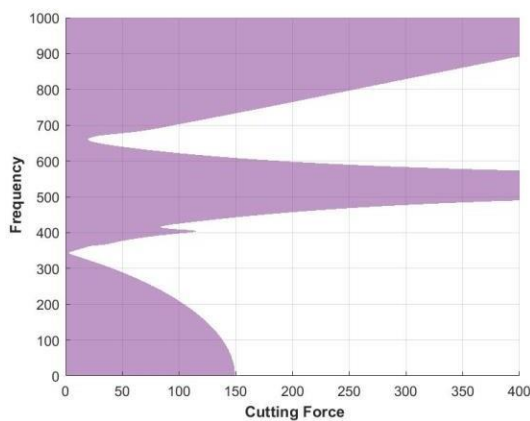
(b)



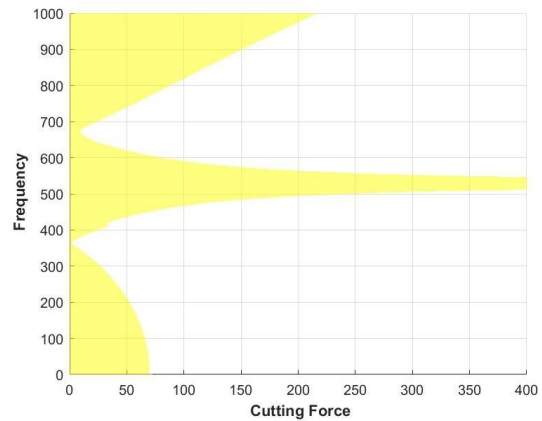
(c)

Gambar 4. 11 3D Plot of Customized Boring Bar Motion Response with DVA NANANANA Direction (a) x-axis, (b) y-axis, and (c) z-axis on cutting force 0 N – 400 N with Stable Limit on Each Axis

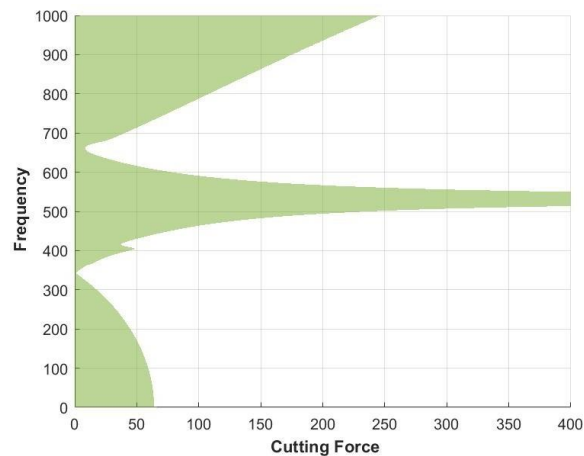
Respon gerak yang memenuhi *stability limit* kemudian dilihat dari tampak atas guna mendapatkan plot surface respon gerak deformasi dibawah *stability limit* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.12 berikut.



(a)



(b)

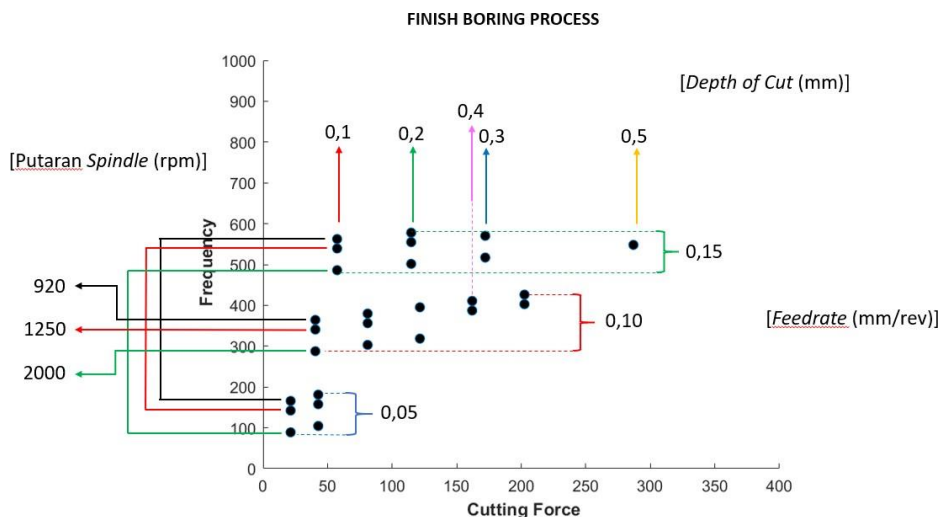


(c)

Gambar 4. 12 *Surface Plot of Stable Motion Response Customized Boring Bar with DVA NANANANA Direction (a) X-axis, (b) Y-axis, and (c) Z-axis at cutting force 0 N – 400 N*

4.3.3. Pengaruh Cutting Parameter Finish Boring AISI 4340 Terhadap Stable Response

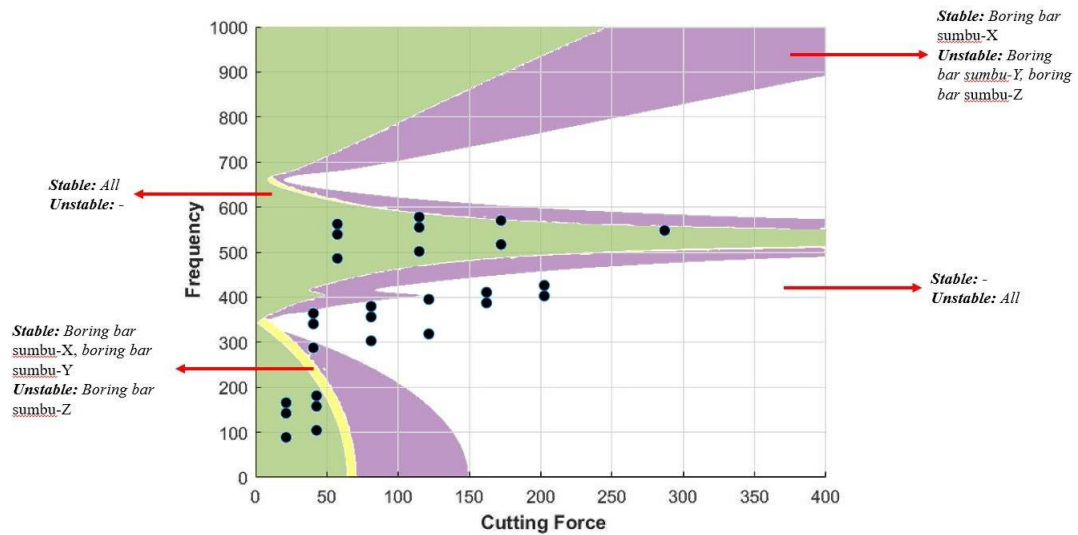
Telah ditentukan 27 *cutting parameter* tipikal *finishing* dimana masing-masing parameter memiliki pengaruh pada *cutting force* dan *chatter frequency* (frekuensi eksitasi). Pada jurnal yang ditulis oleh (Ugochukwu, 2017), (Sun, Beibei; Li, Lie;, 2019) dan (Liu, Liu, & Wu, 2018) dikatakan bahwa *chatter frequency* yang dapat terjadi pada proses *turning lathe machining* berkisar \pm (50 Hz – 600 Hz), hal ini sesuai dengan *chatter frequency* yang digunakan pada penelitian ini, sebagaimana disitasi dari penelitian (Merdekawan, 2020) sebelumnya. Berikut gambar 4.13 merupakan *scatter plot* 27 *cutting force* dan frekuensi eksitasi pada *boring process* tipikal *finishing* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 4. 13 *Scatter Plot 27 Cutting Parameter on Boring Process AISI 4340 Finishing Typical*

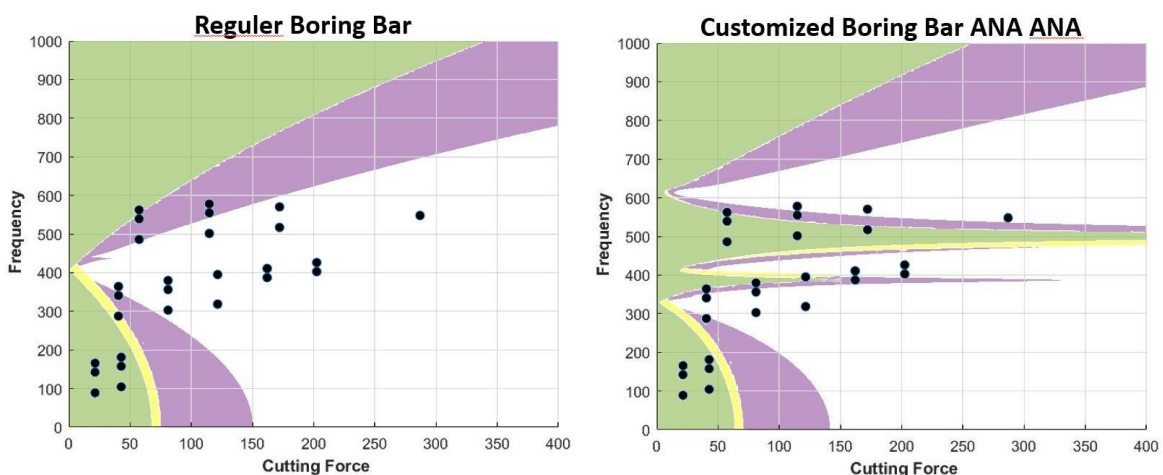
Gambar 4.13 diatas merupakan *cutting parameter* yang dibuat *scatter plot* terhadap *cutting force* (N) dan frekuensi eksitasi (Hz). Dapat dilihat bahwa *cutting parameter* terbagi menjadi tiga daerah yaitu *cutting parameter* dengan *feedrate* 0,05 mm/rev pada bagian bawah,

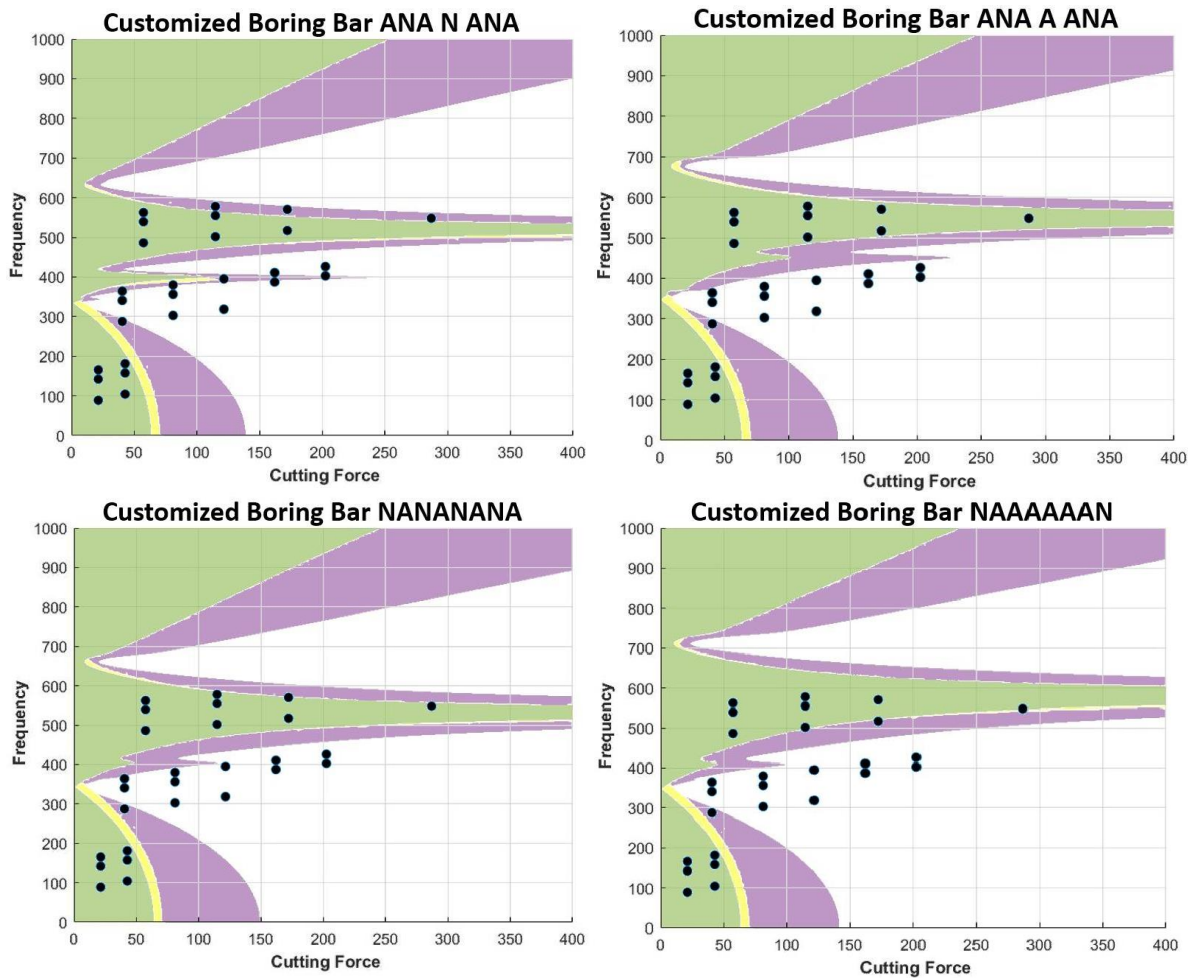
cutting parameter dengan *federate* 0,10 mm/rev pada bagian tengah, dan *cutting parameter* dengan *federate* 0,15 mm/rev pada bagian atas. Setelah mendapatkan *scatter plot cutting parameter* dan frekuensi eksitasi kemudian menggabungkan *scatter plot* tersebut dengan *plot surface respon* gerak dibawah *stability limit* pada masing-masing sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z pada *boring bar* guna mendapatkan daerah perpotongan desain *boring bar* yang memenuhi *stability limit* dari segala aspek. Gambar 4.14 berikut merupakan daerah *stable zone* pada *customized boring bar* dengan DVA NANANANA.



Gambar 4. 14 *Stable Zone Customized Boring Bar DVA NANANANA*

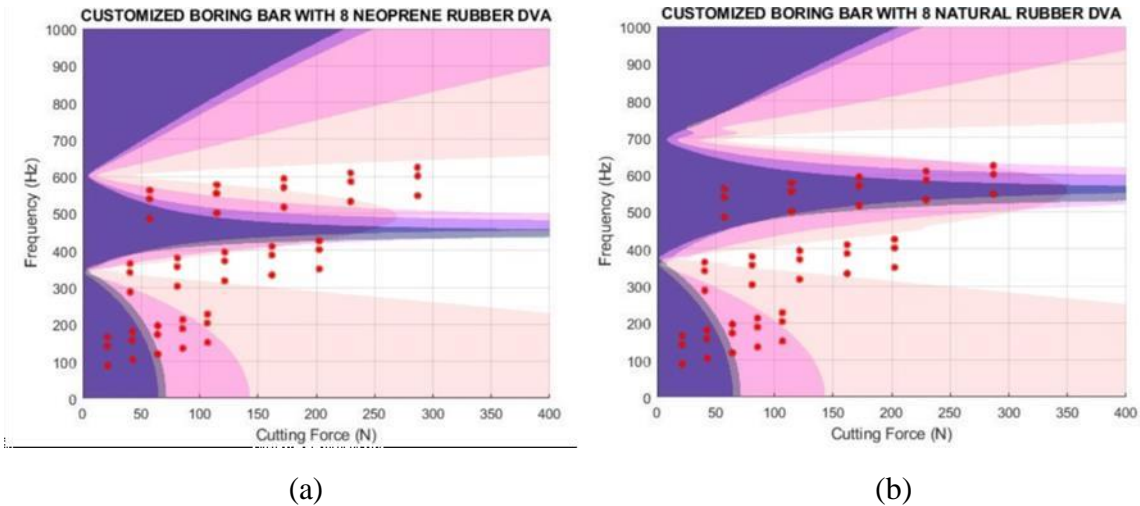
Gambar diatas menunjukkan *stable zone* dari tiap sumbu yang dijadikan satu *plot*. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa terdapat beberapa *cutting parameter* yang tidak berada dalam daerah stabil. Daerah stabil ditunjukkan pada daerah dengan sumbu-X, sumbu-Y, dan sumbu-Z yang beririsan. Daerah berwarna putih merupakan daerah yang tidak stabil untuk seluruh *cutting parameter*. Kemudian dilakukan identifikasi posisi *cutting parameter finishing boring* AISI 4340 terhadap *stable zone* dari *regular boring bar* dan *customized boring bar* dengan 1 *regular boring bar* dan 5 jenis variasi kombinasi DVA sebagaimana ditampilkan pada gambar 4.15 berikut.





Gambar 4. 15 27 Cutting Parameter in Stable Zone from 6 Boring Bar Designs

Dapat dilihat pada gambar 4.15 bahwasanya *customized* boring bar dengan DVA terbagi menjadi 3 daerah stabil, sedangkan *regular boring bar* hanya terbagi menjadi 2 daerah stabil. Daerah stabil yang muncul saat ditambahkan DVA memiliki daerah yang berbeda-beda pada masing-masing desain DVA, dimana semakin banyak karet DVA terpasang pada *boring bar* maka daerah stabil baru respon gerak *boring bar* akan semakin berada pada frekuensi operasional yang tinggi. Pada simulasi diatas ditunjukkan bahwa dari 27 *cutting parameter* yang mampu stabil pada *customized boring bar* dengan pemasangan satu jenis karet belum tentu mampu stabil pada pemasangan variasi kombinasi karet lainnya seperti rancangan *boring bar* pada penelitian ini.



Gambar 4. 16 45 Cutting Parameters in Stable Zone Customized Boring Bar with (a) 8 Neoprene Rubber DVA and (b) 8 Natural Rubber (Merdekawan, 2020)

Gambar 4.16 diatas merupakan *stable zone* dengan menggunakan satu jenis karet (*natural* dengan *natural* dan *neoprene* dengan *neoprene*) yang didapatkan dari penelitian sebelumnya. Pada gambar 4.16 ditunjukkan bahwa *stable zone* pada *customized boring bar* dengan satu jenis karet terbagi menjadi 3 daerah stabil, sama halnya dengan *customized boring bar* pada penelitian ini. Daerah stabil ditunjukkan pada daerah dengan sumbu-X, sumbu-Y, sumbu-Z yang beririsan. Daerah berwarna putih merupakan daerah yang tidak stabil untuk seluruh *cutting parameter*. Dapat dilihat bahwa antara *neoprene rubber* dan *natural rubber* memiliki daerah stabil yang cukup berbeda, dimana cukup banyak *cutting parameter* yang tereliminasi. Apabila dibandingkan dengan *customized boring bar* yang tersusun antara kombinasi karet *neoprene* dan *natural* (8 buah), daerah stabil yang dihasilkan tidak bergeser terlalu signifikan antara satu variasi dengan variasi lainnya. Hal ini akhirnya mendapatkan lebih banyak *cutting parameter* yang berada pada daerah operasional stabil.

Regular boring bar hanya mampu melakukan pengeboran stabil pada 6 buah *cutting parameter* pada *feedrate* (f) = 0,05 mm/rev, putaran *spindle* (N) = 920 rpm, 1250 rpm, 2000 rpm, dan *depth of cut* (d) = 0,1 mm, 0,2 mm. *Boring bar* kemudian didesain sedemikian rupa agar dapat melakukan pengeboran tipikal *finishing* dengan baik, dimana dari 27 *cutting parameter* yang paling optimal digunakan oleh satu jenis DVA pada *boring bar*, belum tentu mampu optimal digunakan oleh kombinasi *rubber-DVA*. Dalam penelitian ini ditemukan 12 *cutting parameter* yang mampu beroperasi dengan stabil sebagaimana ditunjukkan pada tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6 12 Typical Finishing Cutting Parameters Capable of Stably Boring Process Using 6 Boring Bar Designs

No	Dimension		Cutting Parameter					
	D (m)	L (m)	MRR (cm ² /min)	N (rpm)	V (m/min)	f (mm/rev)	d (mm)	Kc (Mpa)
1	0,04	0,15	0,6	920	115,5	0,05	0,1	4275
2	0,04	0,15	1,2	920	115,5	0,05	0,2	4275
3	0,04	0,15	0,8	1250	157	0,05	0,1	4275

4	0,04	0,15	1,6	1250	157	0,05	0,2	4275
5	0,04	0,15	1,3	2000	251,2	0,05	0,1	4275
6	0,04	0,15	2,5	2000	251,2	0,05	0,2	4275
7	0,04	0,15	1,7	920	115,5	0,15	0,1	3825
8	0,04	0,15	2,4	1250	157	0,15	0,1	3825
9	0,04	0,15	4,7	1250	157	0,15	0,2	3825
10	0,04	0,15	3,8	2000	251,2	0,15	0,1	3825
11	0,04	0,15	7,5	2000	251,2	0,15	0,2	3825
12	0,04	0,15	11,3	2000	251,2	0,15	0,3	3825

Dapat dilihat bahwa setelah diberi DVA, boring bar dapat melakukan proses boring dengan stabil pada 12 cutting parameter, diantaranya yaitu feedrate (f) = 0,05 mm/rev, 0,15 mm/rev, putaran spindle (N) = 920 rpm, 1250 rpm, 2000 rpm, depth of cut (d) = 0,1 mm, 0,2 mm, 0,3 mm. Pada 12 cutting parameter tersebut kemudian dianalisa reduksi getaran serta respon getaran guna mengetahui desain boring bar dengan respon terendah pada masing-masing cutting parameter.

4.4 Analisis Reduksi Getaran Boring Bar

Kemudian dilakukan analisis reduksi getaran guna mengetahui desain boring bar dengan reduksi terendah pada masing-masing cutting parameter di seluruh sumbu pada tabel 4.7- 4.10 berikut ini. Analisis reduksi getaran dilakukan pada regular boring bar dan customized boring bar. Analisis reduksi respon getaran customized boring bar akibat penambahan DVA didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Reduksi} = \frac{(Dr - Dc)}{Dr} \dots \dots \dots (4.1)$$

Dimana:

Dr: Nilai deformasi respon getaran regular boring bar (mm)

Dc: Nilai deformasi respon getaran customized boring bar (mm)

Berikut didapatkan hasil analisa reduksi respon getaran boring bar pada sumbu-x dengan melihat nilai respon regular boring bar yang dibandingkan dengan customized boring bar pada tiap variasi jenis karet natural rubber dan neoprene rubber.

Tabel 4. 7 *Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in x-axis*

Cutting Parameter	Response Axial (mm)											
	Regular (x)	Customized (x)										
		ANA ANA	Redc	ANA N ANA	Redc	ANA A ANA	Redc	NANANANA	Redc	NAAAAAN	Redc	
1	0.0006	0.000625	-11.3%	0.00064	-13.5%	0.00064	-13.5%	0.00065	-8.1%	0.00054	3.3%	
2	0.0012	0.001317	-12.9%	0.00134	-15.1%	0.00134	-15.1%	0.00125	-6.9%	0.00131	-12.4%	
3	0.0005	0.000583	-9.4%	0.00060	-11.6%	0.00060	-11.7%	0.00052	1.8%	0.00058	-9.3%	
4	0.0011	0.001219	-10.6%	0.00124	-12.8%	0.00124	-12.9%	0.00116	-4.9%	0.00122	-10.4%	
5	0.0005	0.000527	-7.2%	0.00054	-9.4%	0.00054	-9.6%	0.00050	-1.7%	0.00053	-7.2%	
6	0.001	0.0013	-30.0%	0.00110	-9.9%	0.00110	-10.0%	0.00102	-2.2%	0.00108	-7.6%	
7	0.0014	0.001441	-4.6%	0.00104	24.7%	0.00014	90.0%	0.00031	77.2%	0.00019	86.3%	
8	0.0017	0.000712	57.1%	0.00025	85.0%	0.00017	90.0%	0.00036	78.1%	0.00015	91.0%	
9	0.003	0.002392	19.6%	0.00104	65.2%	0.00018	94.1%	0.00048	83.9%	0.00049	83.5%	
10	0.003	0.000318	89.4%	0.00055	81.4%	0.00079	73.6%	0.00051	83.1%	0.00032	89.4%	
11	0.005	0.000891	82.2%	0.00079	84.2%	0.00065	87.0%	0.00079	84.2%	0.00146	71.0%	
12	0.0064	0.000867	86.4%	0.00041	93.5%	0.00114	82.0%	0.00057	91.0%	0.00041	93.5%	

Tabel 4.7 menunjukkan persentase reduksi getaran secara keseluruhan pada sumbu-x yang didapatkan dengan cara membandingkan nilai *customized boring bar* terhadap *regular boring bar*. Pada *customized boring bar* didapatkan nilai reduksi getaran terbesar pada *cutting parameter* 9 yaitu 94.1% pada *customized boring bar* DVA ANA A ANA. Sementara itu, nilai reduksi getaran terkecil berada pada *cutting parameter* 6 yaitu -30% untuk *customized boring bar* DVA ANA ANA. Nilai minus pada hasil persentase reduksi getaran menandakan bahwa *boring bar* tersebut tidak mampu mereduksi dengan baik.

Tabel 4. 8 *Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in y-axis*

Cutting Parameter	Response Tangential (mm)										
	Regular (y)	Customized (y)									
		ANA ANA	Redc	ANA N ANA	Redc	ANA A ANA	Redc	NANANANA	Redc	NAAAAAAN	Redc
1	0.019	0.02122	-10.6%	0.02122	-10.5%	0.02122	-10.6%	0.02115	-10.2%	0.01910	0.60%
2	0.04	0.04430	-12.0%	0.04428	-11.8%	0.04427	-11.7%	0.04411	-11.3%	0.04413	-11.38%
3	0.018	0.02005	-9.1%	0.02005	-9.1%	0.02007	-9.2%	0.0183	0.4%	0.02002	-8.96%
4	0.038	0.04158	-10.0%	0.04157	-10.0%	0.04161	-10.1%	0.04145	-9.7%	0.04150	-9.81%
5	0.017	0.01841	-7.3%	0.01841	-7.3%	0.01844	-7.4%	0.01837	-7.0%	0.01840	-7.21%
6	0.035	0.03753	-7.9%	0.03753	-7.9%	0.03759	-8.0%	0.03746	-7.7%	0.03751	-7.82%
7	0.071	0.07065	0.1%	0.03073	56.5%	0.00014	90.4%	0.01558	78.0%	0.00797	88.77%
8	0.089	0.04114	53.8%	0.01487	83.3%	0.01309	85.3%	0.00530	94.1%	0.00463	94.80%
9	0.151	0.11957	20.8%	0.05076	66.4%	0.00859	94.3%	0.02440	83.8%	0.01539	89.81%
10	0.202	0.03748	81.5%	0.01947	90.4%	0.03101	84.7%	0.02092	89.7%	0.00516	97.45%
11	0.301	0.04297	85.7%	0.01923	93.6%	0.00892	97.0%	0.02627	91.3%	0.05799	80.71%
12	0.0064	0.06880	80.5%	0.06512	81.6%	0.04077	88.5%	0.01826	94.8%	0.01324	96.26%

Tabel 4.8 menunjukkan persentase reduksi getaran secara keseluruhan pada sumbu-y yang didapatkan dengan cara membandingkan nilai *customized boring bar* terhadap *regular boring bar*. Pada *customized boring bar* didapatkan nilai reduksi getaran terbesar pada *cutting parameter* 10 yaitu 97.45% pada *customized boring bar* DVA NAAAAAAN. Sementara itu, nilai reduksi getaran terkecil berada pada *cutting parameter* 2 yaitu -12% untuk *customized boring bar* DVA ANA ANA. Nilai minus pada hasil persentase reduksi getaran menandakan bahwa *boring bar* tersebut tidak mampu mereduksi dengan baik.

Tabel 4. 9 *Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in z-axis*

Cutting Parameter	Response Radial (mm)										
	Regular (z)	Customized (z)									
		ANA ANA	Redc	ANA N ANA	Redc	ANA A ANA	Redc	NANANANA	Redc	NAAAAAAN	Redc
1	0.00960	0.01072	-11.6%	0.01073	-11.8%	0.01074	-12%	0.01061	-10.6%	0.00100	-4.0%
2	0.02070	0.02339	-13.2%	0.02341	-13.3%	0.02341	-13.4%	0.02313	-11.9%	0.02330	-12.7%
3	0.00910	0.01000	-9.7%	0.01002	-10.0%	0.01004	-10.1%	0.00931	-1.8%	0.00999	-9.6%
4	0.01950	0.02165	-10.9%	0.02170	-11.1%	0.02170	-11.1%	0.02146	-9.9%	0.02160	-10.6%
5	0.00840	0.00903	-7.5%	0.00905	-7.7%	0.00907	-8.0%	0.00896	-6.7%	0.00903	-7.5%
6	0.01770	0.01914	-7.9%	0.01919	-8.2%	0.01921	-8.3%	0.01900	-7.1%	0.01914	-7.9%
7	0.02450	0.02712	-10.6%	0.01207	50.8%	0.00153	93.8%	0.00639	74.0%	0.00309	87.4%
8	0.02950	0.01364	53.7%	0.00494	83.2%	0.00623	78.9%	0.00267	90.9%	0.00223	92.4%
9	0.05230	0.04473	14.5%	0.01944	62.9%	0.00516	90.1%	0.00975	81.4%	0.00813	84.5%
10	0.05220	0.01566	70.0%	0.00915	82.5%	0.01297	75.1%	0.00928	82.2%	0.00514	90.2%
11	0.08730	0.02702	69.1%	0.01060	87.9%	0.00449	94.6%	0.01248	85.7%	0.02523	71.1%
12	0.10950	0.01709	84.4%	0.02904	73.5%	0.02647	75.8%	0.00965	91%	0.00615	94.8%

Tabel 4.9 menunjukkan persentase reduksi getaran secara keseluruhan pada sumbu-z yang didapatkan dengan cara membandingkan nilai *customized boring bar* terhadap *regular boring bar*. Pada *customized boring bar* didapatkan nilai reduksi getaran terbesar pada *cutting*

parameter 12 yaitu 94.8% pada *customized boring bar* DVA NAAAAAAN. Sementara itu, nilai reduksi getaran terkecil berada pada *cutting parameter* 2 yaitu -13.4% untuk *customized boring bar* DVA ANA A ANA. Nilai minus pada hasil persentase reduksi getaran menandakan bahwa *boring bar* tersebut tidak mampu mereduksi dengan baik.

Tabel 4. 10 *Response and Vibration Reduction of Boring Bars Capable of Boring Process Stably at 12 Cutting Parameters Typical Finishing with AISI 4340 Specimen in all axis*

No	Response (mm)										
	Reguler			Customized							
	Axial (x)	Tangential (y)	Radial (z)	Stable Response	Lowest Response	Axial (x)	Redc (%)	Tangential (y)	Redc (%)	Radial (z)	Redc (%)
1	0.0006	0.019	0.0096	ALL	NAAAAAAN	0.00054	3.2%	0.0191	0.6%	0.0100	-4%
2	0.0012	0.040	0.0207	ALL	Reguler	0.00117	-	0.0396	-	0.0207	-
3	0.0005	0.018	0.0091	ALL	NANANANA	0.00052	1.8%	0.0183	0.4%	0.0093	-1.8%
4	0.0011	0.038	0.0195	ALL	Reguler	0.00110	-	0.0378	-	0.0195	-
5	0.0005	0.017	0.0084	ALL	Reguler	0.00049	-	0.0172	-	0.0084	-
6	0.0010	0.035	0.0177	ALL	Reguler	0.00100	-	0.0348	-	0.0177	-
7	0.0014	0.071	0.0245	ANA N ANA	ANA A ANA	0.00014	90.0%	0.0068	90.4%	0.0015	94%
				ANA A ANA							
				NANANANA							
				NAAAAAAN							
8	0.0017	0.089	0.0295	ANA ANA	NAAAAAAN	0.00015	91.0%	0.0046	94.8%	0.0022	92%
				ANA N ANA							
				ANA A ANA							
				NANANANA							
9	0.0030	0.151	0.0523	ANA N ANA	ANA A ANA	0.00018	94.1%	0.0086	94.3%	0.0052	90%
				ANA A ANA							
				NANANANA							
				NAAAAAAN							
10	0.0030	0.202	0.0522	ANA ANA	NAAAAAAN	0.00032	89.4%	0.0052	97.4%	0.0051	90%
				ANA N ANA							
				ANA A ANA							
				NANANANA							
11	0.0050	0.301	0.0873	ANA ANA	ANA A ANA	0.00065	87.0%	0.0089	97.0%	0.0045	95%
				ANA N ANA							
				ANA A ANA							
				NANANANA							
12	0.0064	0.354	0.1095	ANA ANA	NAAAAAAN	0.00041	93.5%	0.0132	96.3%	0.0061	94%
				ANA N ANA							
				ANA A ANA							
				NAAAAAAN							

Berdasarkan data pada tabel 4.6 diatas, dapat dilihat bahwa pada variasi *federate* = 0,05 mm/rev, putaran *spindle* 920 rpm, 1250 rpm, 2000 rpm, dan *depth of cut* =0,1 mm, 0,2mm yakni pada *cutting parameter* 1-6, semua desain *boring bar* dapat beroperasi dengan stabil, namun pada kondisi ini memiliki *material removal rate* yang sangat kecil yakni 0,6 cm² /min – 2,5 cm² /min. Pada *cutting parameter* 7 – 12 hanya boring bar dengan DVA yang dapat beroperasi dengan stabil, adapun dari 5 variasi *boring bar* dengan DVA, hanya 3 yang memiliki respon gerak paling rendah yakni boring bar dengan DVA ANA A ANA, NANANANA, dan NAAAAAAN.

Pada proses *boring*, operator akan selalu berusaha melakukan pengeboran dengan *material removal rate* yang besar guna mempersingkat *machining time* dan mengurangi biaya listrik mesin bubut. Selain itu tentunya pada proses *boring* diharap dapat menghasilkan produk dengan permukaan yang halus, serta toleransi minimum. Ditinjau dari 12 *cutting parameter* yang dapat

beroperasi dengan stabil, *boring bar* yang memiliki komposisi *rubber* natural paling banyak dapat melakukan proses boring AISI 4340 dengan *material removal rate* yang besar. *Customized boring bar* NAAAAAAN mampu bekerja pada *material removal rate* paling tinggi yakni $11,3 \text{ cm}^2 / \text{rev}$ pada *cutting parameter* ke-12 yakni putaran *spindle* = 2000 rpm, *feedrate* = 0,15 mm/rev, dan *depth of cut* = 0,3 mm. Adapun respon getaran yang memiliki deformasi paling rendah yakni pada *cutting parameter* ke-8 menggunakan *boring bar* dengan DVA NAAAAAAN, dengan *material removal rate* $2,4 \text{ cm}^2 / \text{min}$ pada putaran *spindle* 1250 rpm, *feedrate* = 0,15 mm/rev, dan *depth of cut* = 0,1 mm, memiliki respon gerak boring bar 0,00015 mm arah sumbu-X, 0,004 arah sumbu-Y, dan 0,002 arah sumbu-Z. Namun variasi *boring bar* dengan *stable response* paling luas dimiliki oleh variasi *boring bar* ANA A ANA. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *cutting parameter* yang sesuai dengan frekuensi operasionalnya maka akan memiliki *stable zone* yang lebih luas.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dirancang desain dan mekanisme dari *dynamic vibration absorber* yang terdiri dari 2 komponen yakni *mass ring* dengan inner diameter 25 mm, *outer diameter* 30 mm, panjang 40 mm berbahan *brass*, dan karet dengan *inner diameter* 20 mm, *outer diameter* 25 mm, panjang 5 mm berbahan *neoprene* dan *natural rubber*. Jumlah karet yang terpasang terbagi menjadi 5 variasi kombinasi yaitu variasi ANA ANA, ANA N ANA, ANA A ANA, NANANANA, dan NAAAAAAN. Karet dipasang secara *rough* terhadap *boring bar*. *Dynamic vibration absorber* kemudian dipasang pada *boring bar* rasio L/D 8 dengan material AISI 4140 yang sudah diberi pengurangan diameter pada bagian depan.
2. Jumlah dan jenis karet sangatlah mempengaruhi *dynamic response* dari *boring bar*, dimana pada kedua jenis karet semakin banyak jumlah karet terpasang maka daerah redaman akan semakin berada pada frekuensi eksitasi yang lebih besar dan respon gerak *boring bar* akan mampu tetap stabil pada gaya yang lebih besar. *Connection* pada susunan *rubber mass DVA* juga mempengaruhi respon getaran yang terjadi pada *boring bar*. Berdasarkan persentase reduksi getaran, variasi DVA NAAAAAAN merupakan variasi *customized boring bar* terbaik dengan memiliki persentase reduksi paling besar.
3. Terdapat 27 variasi *cutting parameter* tipikal *finishing* pada penelitian ini, dimana *regular boring bar* mampu melakukan proses *boring* pada 6 variasi *cutting parameter* (22,2%) dengan *material removal rate* 0,6 cm²/min – 2,5 cm²/min dan respon gerak *boring bar* terendah yakni 0,0004 mm arah sumbu-X, 0,0171 mm arah sumbu-Y, dan 0,0084 mm arah sumbu-Z pada putaran *spindle* = 2000 rpm, *feedrate* = 0,05 mm/rev, dan *depth of cut* = 0,1 mm. *Customized boring bar* dengan DVA mampu melakukan proses *boring* pada 12 variasi *cutting parameter* (44,4%) dengan *material removal rate* 0,6 cm²/min – 11,3 cm²/min dan respon gerak *boring bar* terendah yakni 0,00015 mm arah sumbu-X, 0,0046 mm arah sumbu-Y, dan 0,0022 mm arah sumbu-Z, pada putaran *spindle* 1250 rpm, *feed rate* 0,15 mm dan *depth of cut* 0,1 mm oleh *customized boring bar* dengan DVA NAAAAAAN. *Customized boring bar* tersebut juga mampu bekerja pada *material removal rate* paling tinggi yakni 11,3 cm²/min pada *cutting parameter* ke-12 yakni putaran *spindle* = 2000 rpm, *feedrate* = 0,15 mm/rev, dan *depth of cut* = 0,3 mm. Namun, variasi *customized boring bar* DVA ANA A ANA memiliki daerah operasional stabil yang paling luas. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *cutting parameter* yang sesuai dengan frekuensi operasionalnya akan memiliki *stable zone* yang lebih luas.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Disarankan untuk melakukan analisis pengaruh variasi kombinasi karet DVA terhadap *range cutting parameter* yang lebih besar guna mengetahui *stable zone* dengan rentang frekuensi yang lebih luas.
2. Respon getaran pada boring bar arah *axial* dapat diabaikan.
3. Panjang *overhang boring bar* yang digunakan dapat lebih tinggi lagi agar dapat melakukan proses *boring* lebih dalam.

Halaman ini sengaja dikosongkan

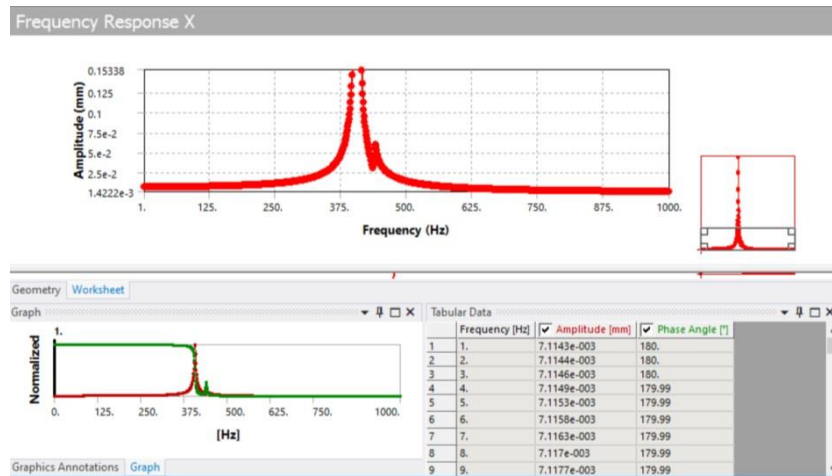
DAFTAR PUSTAKA

- Fountas, N. F., Koutsomichalis, A., Kechagias, J. D., & Vaxevanidis, N. M. (2019). *Multi-response optimization of CuZn39Pb3 brass alloy turning by implementing Grey Wolf algorithm*. 50, 584–594.
<https://pdfs.semanticscholar.org/27f7/593307dba0feeb68148d1e6e59ba184f9f34.pdf>
- Kalpakjian, & Schmid. (2001). *Manufacturing Engineering and Technology*.
- Kelly, S. G. (2011). *Mechanical Vibrations Theory and Applications*.
- Liu, X., Liu, Q., Wu, S., Li, R., & Gao, H. (2018). Analysis of the vibration characteristics and adjustment method of boring bar with a variable stiffness vibration absorber. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1–4), 95–105.
<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0453-4>
- Merdekawan, N. (2020). *Pemodelan dan Analisis Respon Getaran Boring Bar pada Internal Turning Akibat Pengaruh Variasi Jumlah dan Jenis Karet DVA pada Gaya Pemotongan Tipikal Finishing*.
- Nugraha, B.A. (2020). *Analisa Nilai Optimum Reduksi Getaran Akibat Variasi Kombinasi Kekakuan DVA pada Boring Bar Terhadap Proses Finishing Mesin Bubut (Lathe Machine)*.
- Okonkwo, U., Okokpujie, I. P., Emeka Okafor, C., Obinna, N. N., Ugochukwu, O. C., Christian, O. E., & Imhade, O. P. (2017). evaluation of chatter vibration frequency in cnc turning of 4340 alloy steel material. *Article in International Journal of Scientific and Engineering Research*, 8(2). <http://www.ijser.org>
- Pachpute, A. Z., & Bawa, P. B. (2015). Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber-A Simulation Approach. *International Journal of Recent Engineering Research and Development*. www.ijrerd.com
www.ijrerd.com
- Rao, S. S. (2011). *Mechanical vibrations*. Prentice Hall.
- Widarto. (2008). *Teknik Pemesinan*.
- Yadav, A., Talaviya, D., Bansal, A., & Law, M. (2020b). Design of chatter-resistant damped boring bars using a receptance coupling approach. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(2). <https://doi.org/10.3390/jmmp4020053>

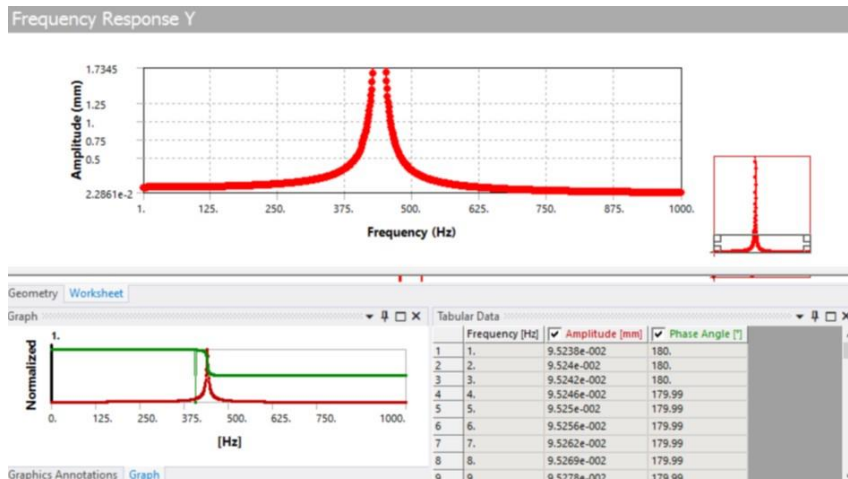
Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

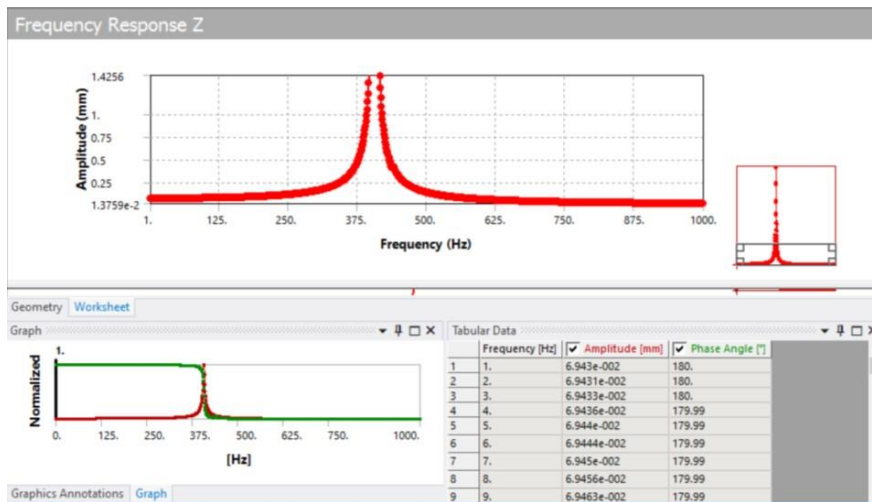
1. Frequency response regular boring bar arah sumbu (a) axial (b) tangential (c) radial



(a)



(b)

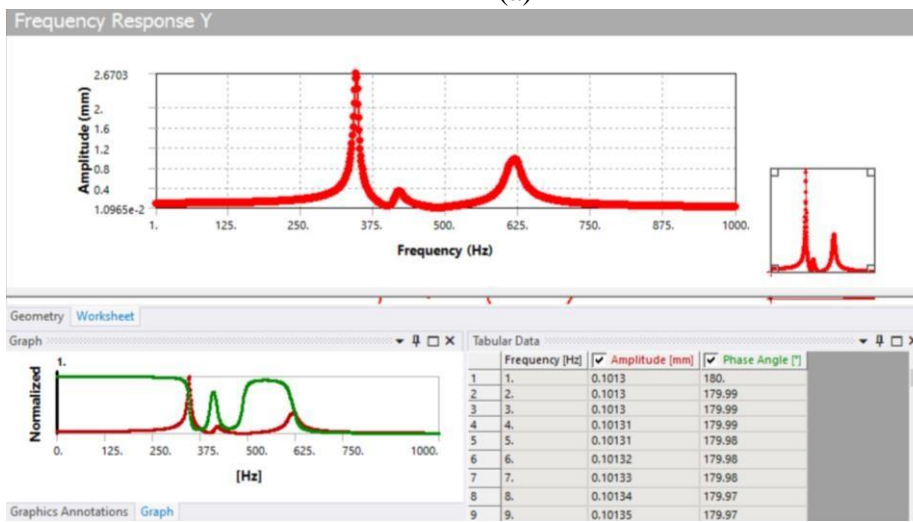


(c)

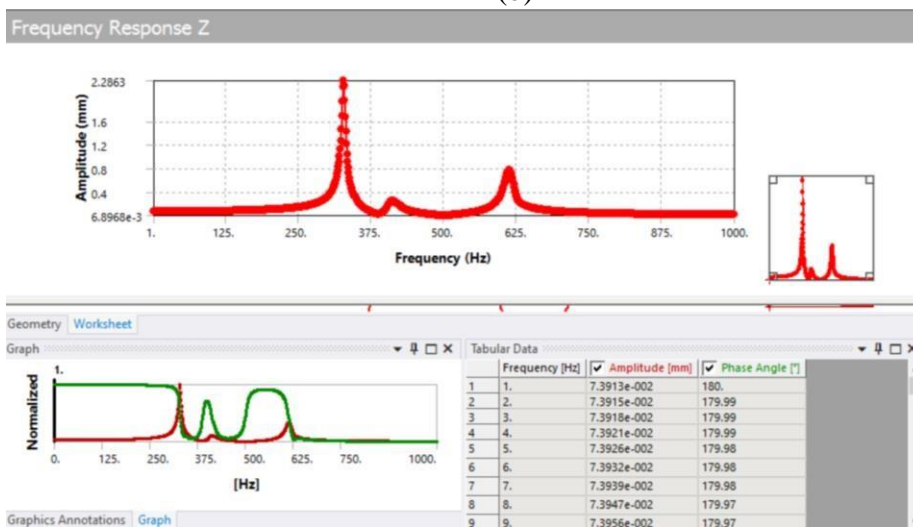
2. Frequency response customized boring bar dengan DVA ANA ANA arah sumbu (a) axial (b) tangential (c) radial



(a)

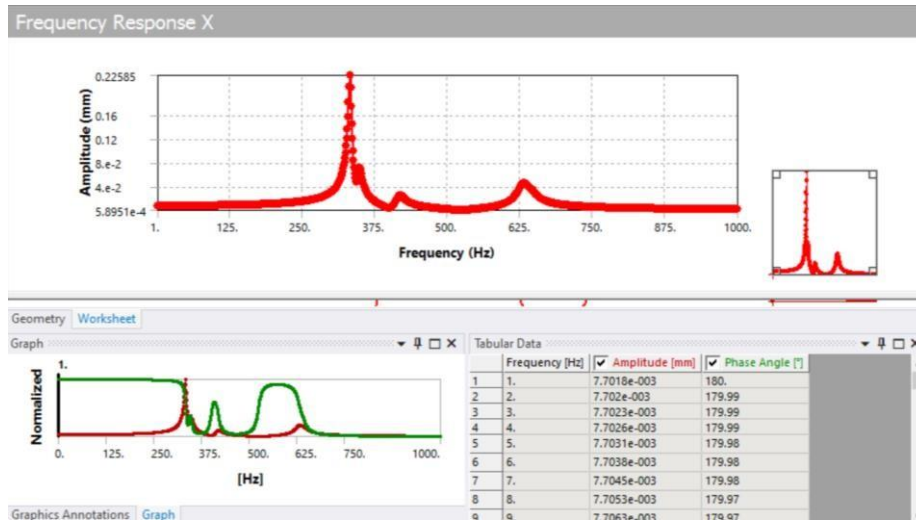


(b)

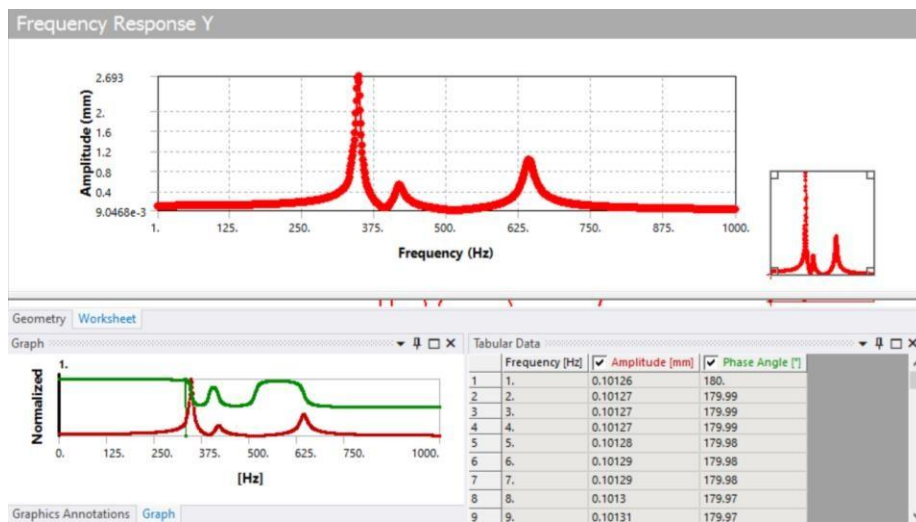


(c)

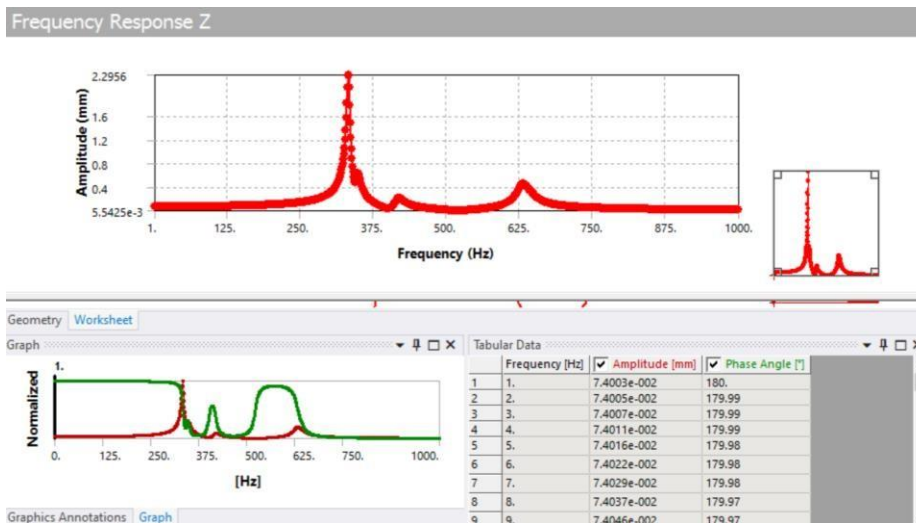
3. Frequency response customized boring bar dengan DVA ANA N ANA arah sumbu
 (a) axial (b) tangential (c) radial



(a)

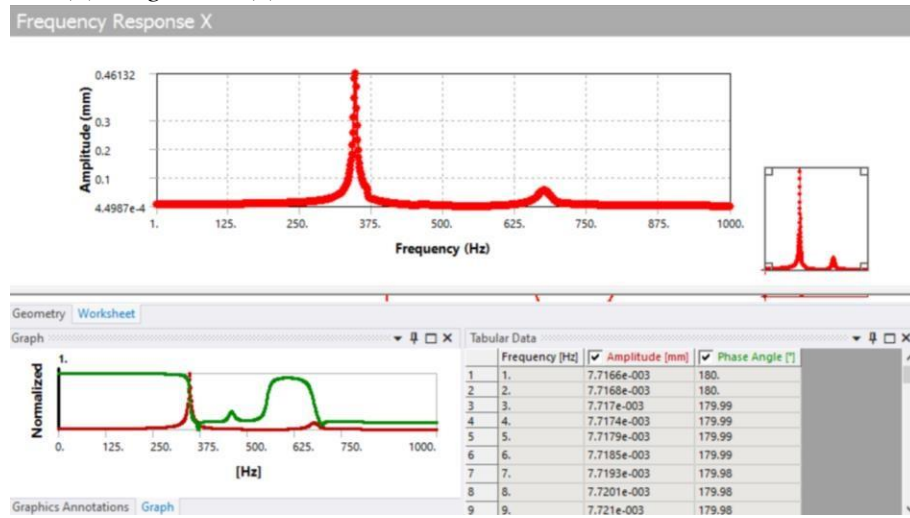


(b)

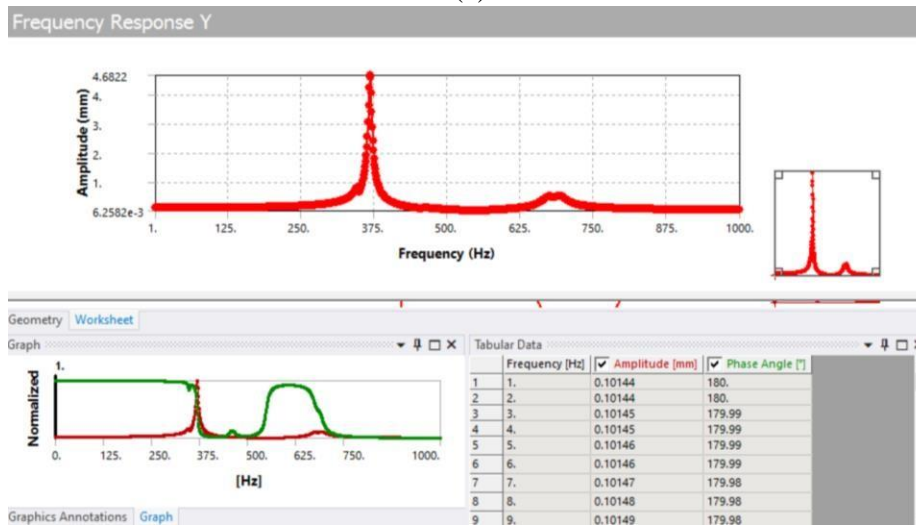


(c)

4. Frequency response customized boring bar dengan DVA ANA A ANA arah sumbu
(a) axial (b) tangential (c) radial



(a)



(b)

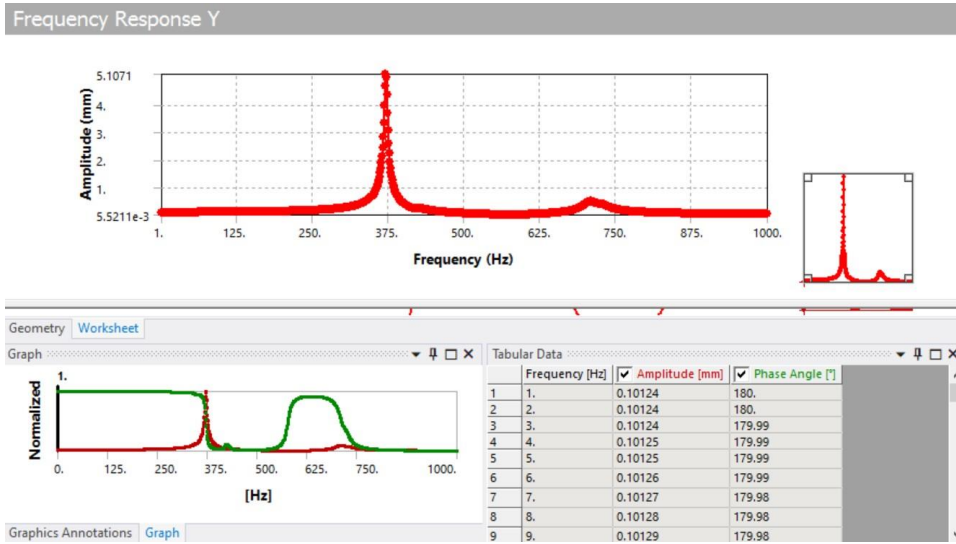


(c)

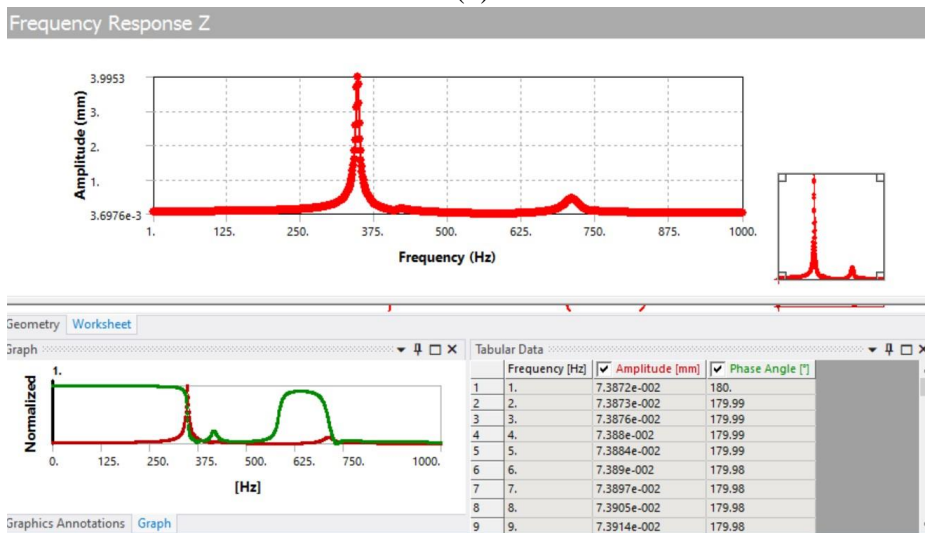
5. Frequency response customized boring bar dengan DVA NANANANA arah sumbu
 (a) axial (b) tangential (c) radial



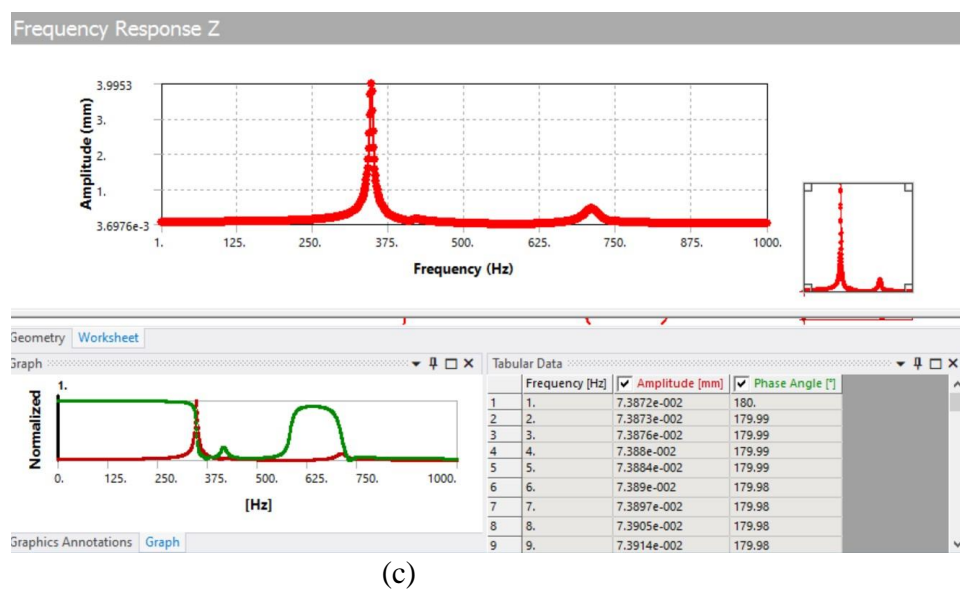
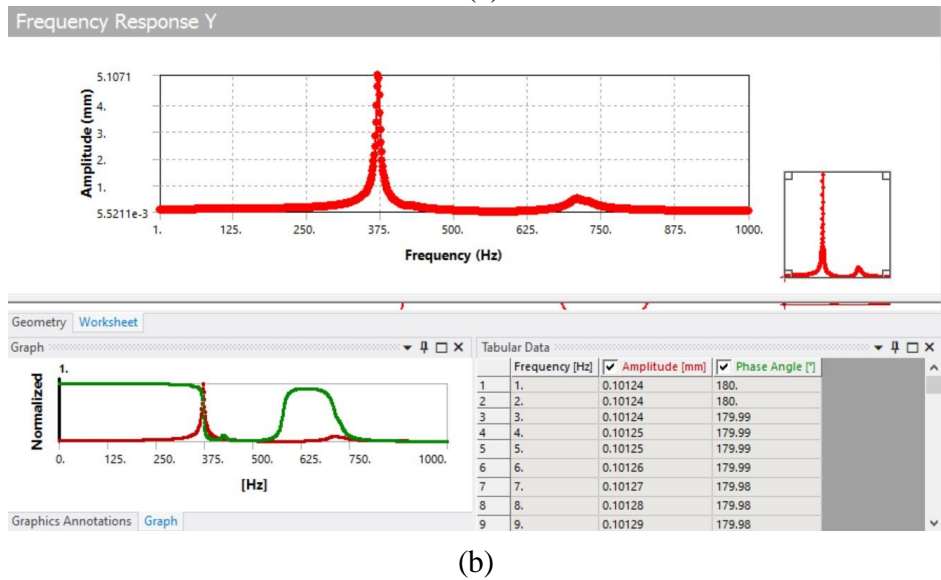
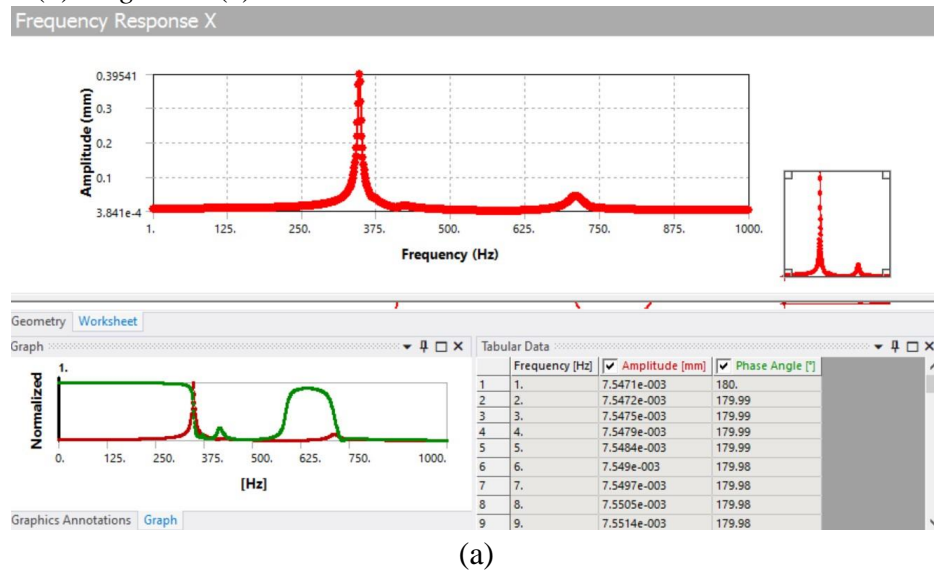
(a)



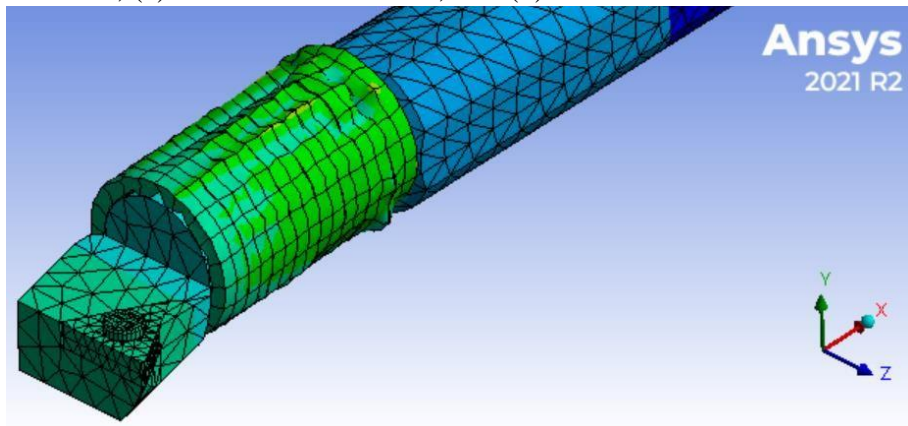
(b)



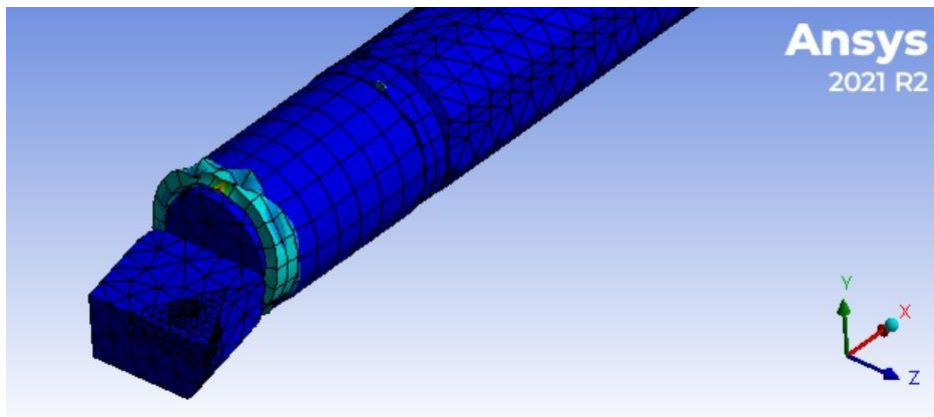
6. Frequency response customized boring bar dengan DVA NAAAAAAN arah sumbu
 (a) axial (b) tangential (c) radial



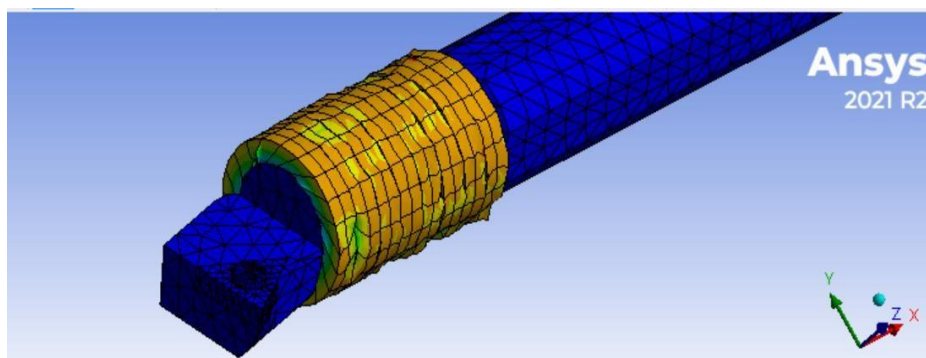
7. Mode shape ke-4 customized boring bar (a) DVA NAAAAAAN, (b) DVA N-AAAAAA-N, (c) DVA NANANANA, dan (d) DVA NNNN AAAA



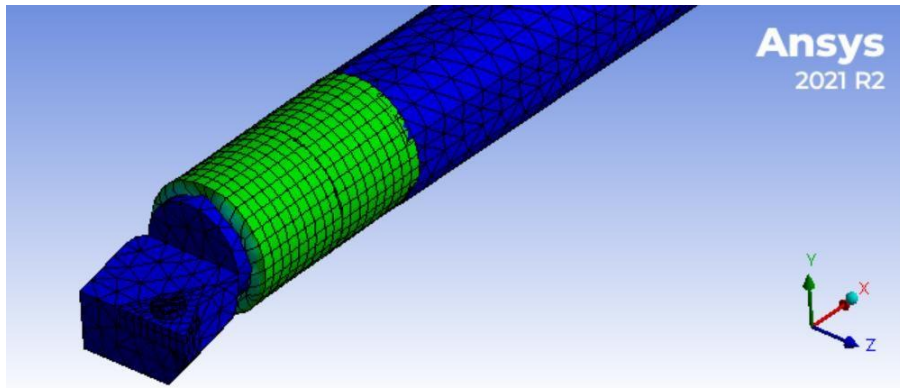
(a)



(b)



(c)



(d)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Ikralhaq Hilliriany Adriadi dilahirkan di Bogor, 1 Maret 2001, merupakan anak kedua dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh Pendidikan formal yaitu di TK Islam Al - Azhar 25 Bandung, SDN Merdeka 5 Bandung, SMP Taruna Bakti Bandung, dan SMA Taruna Bakti Bandung. Setelah lulus dari SMA tahun 2018, Penulis mengikuti SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FT-IRS ITS pada tahun 2018 dan terdaftar dengan NRP 02111840000099. Penulis menyelesaikan kuliah dalam program studi S-1 Departemen Teknik Mesin, FT-IRS ITS pada tahun 2022.

Di Departemen Teknik Mesin Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan akademik maupun non-akademik yang diselenggarakan oleh Departemen Teknik Mesin dan Himpunan Mahasiswa Mesin (HMM) FT-IRS ITS. Penulis pernah menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Mesin dalam periode kepengurusan 2019/2020 sebagai staf Departemen Hubungan Luar dan sebagai Sekretaris Departemen Hubungan Luar pada periode kepengurusan 2020/2021. Dalam kegiatan akademik, Penulis aktif menjadi Asisten Praktikum dan Grader mata kuliah Mekanika Getaran. Dalam menunjang Tugas Akhir, Penulis mengambil bidang desain, khususnya pada Lab. Rekayasa Vibrasi & Sistem Otomotif. Untuk kritik dan saran dari pembaca terkait penelitian ini, maupun hal lainnya dapat melalui kontak pada email alir.adriadi@gmail.com