TUGAS AKHIR - TF 181801

ANALISA PENGARUH GETARAN POMPA TERHADAP STRUKTUR BANGUNAN DI RUMAH POMPA IPAM KARANGPILANG III PDAM SURABAYA

Septyan Arief Isnandar
NRP 02311440000029

Dosen Pembimbing :
Dr.Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.

Program Studi S-1 Teknik Fisika
Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

“Halaman ini memang dikosongkan”

FINAL PROJECT - TF 181801

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PUMP VIBRATION ON BUILDING STRUCTURES IN THE PUMP HOUSE OF IPAM KARANGPILANG III PDAM SURABAYA

Septyan Arief Isnandar
NRP 02311440000029

Supervisors :
Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.

Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2019

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	: Septyan Arief Isnandar
NRP	: 02311440000029
Departemen / Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "*Analisa Pengaruh Getaran Pompa Terhadap Struktur bangunan di Rumah Pompa IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya*" adalah benar-benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia untuk menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 30 Januari 2019
Yang membuat pernyataan,

Septyan Arief Isnandar
NRP. 02311440000029

“Halaman ini memang dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR

ANALISA PENGARUH GETARAN POMPA TERHADAP STRUKTUR BANGUNAN DI RUMAH POMPA IPAM KARANGPILANG III PDAM SURABAYA

Oleh:
Septyan Arief Isnandar
NRP. 02311440000029

Surabaya, 8 Februari 2019

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Dr. Dhany Arifianto, S.T., M.Eng.
NIP. 197310071998021001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 197809022003121002

“Halaman ini memang dikosongkan”

ANALISA PENGARUH GETARAN POMPA TERHADAP STRUKTUR BANGUNAN DI RUMAH POMPA IPAM KARANGPILANG III PDAM SURABAYA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Vibrasi dan Akustik
Progam Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Septyan Arief Isnandar
NRP. 02311440000029

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Dhany Arifianto. S.T., M.Eng. ..... (Pembimbing)
2. Ir Wiratno Argo Asmoro, M.Sc. ..... (Penguji 1)
3. Ir Yerri Susatio, M.T. ..... (Penguji 2)
4. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. ..... (Penguji 3)

SURABAYA
Maret, 2019

“Halaman ini memang dikosongkan”

ANALISA PENGARUH GETARAN POMPA TERHADAP STRUKTUR BANGUNAN DI RUMAH POMPA IPAM KARANGPILANG III PDAM SURABAYA

Nama : **Septyan Arief Isnandar**
NRP : **0231144000029**
Departemen : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Dhany Arifianto, S.T, M.Eng.**

Abstrak

Pada rumah pompa IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya diduga telah terjadi kerusakan struktur bangunan, pada sekitar area pompa terjadi retakan-retakan plesteran, bila plester (pelindung rangka baja) pada beton telah terkelupas, maka fungsi redaman getar akan turun 49%, oleh karena itu perlu adanya analisa untuk mengetahui penyebab terjadinya penurunan pondasi apakah disebabkan oleh dampak getaran pompa terhadap struktur atau disebabkan oleh kualitas struktur yang kurang bisa meredam getaran dari sumber getar. Maka dilakukan analisa getaran pompa terhadap struktur bangunan dan membandingkan *displacement* pompa terhadap kemampuan *displacement* struktur. Pengambilan data percepatan getar pompa dilakukan di tiga titik, kemudian penurunan satuan dari percepatan getar menjadi kecepatan getar, sehingga dapat diketahui daerah getar terhadap dampak kerusakan struktur. Dari referensi dokumen Kepmen LH no 49 tahun 1996 tentang baku mutu tingkat getaran. Nilai PPV yang didapat dari pengukuran berada pada frekuensi 16,5 Hz (1RPM), sehingga pada pompa 3 dan pompa 4 nilai PPV sudah berada pada kondisi kategori B dengan nilai lebih dari 4 mm/s sehingga akan memberikan dampak kerusakan pada plaster struktur. Kemudian dilakukan pemodelan matematis untuk mengetahui lendutan dari penopang pompa, didapatkan nilai lendutan paling kecil sebesar 1,2 mm, sedangkan batas maksimum yang diijinkan yaitu 0,5 mm, sehingga perlu adanya penguatan pada beton. Besarnya energi yang dirambatkan dapat diketahui dengan menganalisa

transmissibility pada *node* 4 sebagai acuan, didapatkan hasil bahwa energi yang dirambatkan dari sumber pompa 3 ke pondasi sebesar 68% dan dari pondasi ke struktur beton sebesar 85%.

Kata Kunci: getaran stuktur, pemodelan *beam*, *transmissibility*

ANALYSIS OF THE EFFECT OF PUMP VIBRATION ON BUILDING STRUCTURES IN THE PUMP HOUSE OF IPAM KARANGPILANG III PDAM SURABAYA

Name	***: Septyan Arief Isnandar***
NRP	***: 0231144000029***
Department	***: Engineering Physics FTI-ITS***
Supervisors	***: Dr. Dhany Arifianto, S.T, M.Eng.***

Abstract

The building structure of the pump house of IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya is in damage. There are plastered cracks around the pump. When the plaster (steel frame protector) is broken, its function drops by 49%. Therefore, an analysis is needed to determine the cause of the foundation decline: whether it is caused by the impact of pump vibration on the structure or by the quality of the structure which is less able to reduce vibration from the vibration source. Analyzing the vibration of the pump on the building structure and comparing the displacement of the pump to the displacement structure capacity were conducted. Data of pump vibration acceleration were taken from three points, then the unit of vibration acceleration was converted to vibration velocity, so the vibration area over the impact of structural damage was determined. Referring to the document of Kepmen LH No. 49 1996 concerning the level of quality standards, the value of PPV obtained from the measurement was at the frequency of 16.5 Hz (1RPM). PPV value of pump 3 and pump 4 were already in the B condition category with 4 mm/s more, thus this impacted the plaster structure. Then mathematical modeling was operated to find out the deflection of the pump support. The smallest deflection with the value of 1.2 mm was obtained while the maximum allowable limit is 0.5 mm. Therefore, the concrete needs to be strengthened. The amount of energy that was propagated can be seen by analyzing the transmissibility on node 4 as a reference. It was found that the

energy propagated from pump source 3 to the foundation was 68% and from the foundation to the concrete structure was 85%.

Key Words: vibration structure, beam modelling, transmissibility

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **ANALISA PENGARUH GETARAN POMPA TERHADAP STRUKTUR BANGUNAN DI RUMAH POMPA IPAM KARANGPILANG III PDAM SURABAYA**

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Kedua orang tua (Bapak Rumaji dan Ibu Yatini). Terima kasih atas segala cinta, kasih sayang, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materil yang telah diberikan.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Kepala Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
3. Bapak Dr. Dhany Arifianto, S.T, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Bapak Ir. Wiratno Argo Asmoro, M.Sc., selaku Kepala Laboratorium Vibrasi dan Akustik yang telah memberikan ilmu, serta kemudahan perizinan.
5. Seluruh teman-teman dan adek-adek keluarga Laboratorium Vibrasi dan Akustik.
6. Seluruh sahabat dan teman – teman Teknik Fisika angkatan 2014.
7. Seluruh teman-teman Nganjuk di konrakan BME E-124 / E-81 beserta sahabat BME.
8. Seluruh dosen, karyawan dan civitas akademik Teknik Fisika, terimakasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.
9. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 30 Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME..... iii
LEMBAR PENGESAHAN.....**Error! Bookmark not defined.**
Abstrak..... vii
Abstract.....ix
KATA PENGANTAR.....xi
DAFTAR ISI..... xiii
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xvii
DAFTAR SIMBOL.....xix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan 2
1.4 Batasan Masalah 3
1.5 Manfaat 3
1.6 Sistematika Penulisan.....3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Getaran Struktur.....5
2.2 Koefisien Redaman 5
2.3 Kepmen LH No. 49 Tahun 1996 Tentang Baku Mutu Getaran.....7
2.4 Kuat Tekan Beton 8
2.5 Modulus Elastis.....9
2.6 Matriks Kekakuan *Beam* 9
2.7 *Transmissibility*.....11
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 13
3.1 Objek Penelitian.....14
3.2 Pengambilan Data Getaran Pompa.....15
3.3 Analisa Kecepatan Getar Terhadap Dampak Kerusakan 16
3.4 Pemodelan *Beam*.....16
3.5 *Transmissibility*.....17
3.6 Penyusunan Laporan 18

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 19
4.1 Percepatan Getar 19
4.2 Kecepatan Getar Terhadap Dampak Kerusakan 20
4.3 Kuat Tekan Beton 22
4.4 Pemodelan Matematis 23
4.5 *Transmissibility* 25
4.6 Nilai Koefisien Redaman 28
4.7 Pembahasan.....29
BAB V PENUTUP.....33
5.1 Kesimpulan 33
5.2 Saran 33
DAFTAR PUSTAKA.....35
LAMPIRAN.....**Error! Bookmark not defined.**
BIODATA PENULIS.....73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Daerah Getar Terhadap Dampak Kerusakan [4]..... 7
Gambar 2.2 Gaya yang Bekerja Pada *Beam* [9]..... 10
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir..... 14
Gambar 3.2 7 Pompa IPAM Karangpilang III 14
Gambar 3.3 Letak Tujuh Pompa Tampak Atas..... 15
Gambar 3.4 Titik Sensor Pengukuran 15
Gambar 3.5 Pemodelan *Beam* Struktur Bangunan 17
Gambar 4.1 Gambar *Beam* Tampak Depan..... 23
Gambar 4.2 Rasio Pengurangan Amplitudo Terhadap Jarak..... 29

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Nilai Maksimal Percepatan (mm/s^2) 20
Tabel 4.2 Nilai *Peak Particle Velocity* (PPV) 21
Tabel 4.3 Baku Tingkat Getaran Terhadap Dampak Kerusakan [4] 21
Tabel 4.4 Hasil Kuat Tekan Beton 22
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil *Displacement* 25
Tabel 4.6 Hasil *Transmissibility* 26
Tabel 4.7 Rasio *Transmissibility* Berdasarkan Nilai Pemodelan Matematis 27
Tabel 4.8 Nilai Koefisien Redaman 28

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL

α	: Koefisien redaman
f'_c	: Kuat tekan Beton (Mpa)
A	: Luas Penampang Benda uji (mm^2)
P	: Kuat Desak mesin (N)
E	: Modulus elastis beton tekan (MPa)
I	: Momen Inersia Batang
L	: Panjang elemen
F_T	: gaya yang *ditransmissikan* (N),
T_a	: rasio *Transmissibility* absolut (dB),
Ω	: kecepatan putar (rad/s),
Ω_o	: frekuensi natural,
r	: rasio frekuensi,
c	: koefisien redaman (Ns/m),
k	: *spring stiffness* (N/m),
m_{total}	: massa total (kg),
x	: *displacement* (m),
ξ	: rasio redaman.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air bersih merupakan kebutuhan pokok yang tidak dapat dipisahkan dari aktifitas manusia sehari-hari, bertambahnya populasi juga akan mempengaruhi konsumsi air bersih, tercatat konsumsi air di kota Surabaya lebih tinggi dari rata-rata konsumsi air secara nasional [2], dalam hal ini PDAM Surabaya bertanggung jawab atas pemenuhan kebutuhan air bersih tersebut, pada awal tahun 2009 pemerintah kota Surabaya sudah menambah IPAM (Instalasi Pengolahan Air Minum) Karangpilang III yang diharapkan mampu memenuhi cakupan kebutuhan air bersih wilayah pelayanan yang sudah ditentukan.

Pada IPAM terdapat rumah pompa yang berfungsi untuk mendistribusikan air, struktur bangunan rumah pompa dibuat untuk menopang pompa-pompa tersebut sehingga harus mampu menahan beban pompa maupun getaran pompa saat beroperasi. Pada struktur yang memiliki sumber getar terus-menerus secara fungsi waktu, akan membawa dampak pada struktur yang ditopang dan sekaligus memiliki peluang perambatan getaran tersebut pada struktur disekitarnya. Secara alamiah getaran akibat operasional mesin, memiliki amplitudo getar yang rendah namun energi konstan [3].

Struktur bangunan dibuat kokoh sehingga mampu untuk menahan getaran operasional mesin, untuk meredam dampak dari getaran tersebut, mesin yang menjadi sumber getar ditempatkan pada pondasi beton. Beton bertulang rangka baja dapat menaikkan kekakuan (*stiffness*) dan redaman (*damping*) hingga 120%. Bila plester (pelindung rangka baja) pada beton telah terkelupas, maka fungsi redaman getaran akan turun 49% [1]. Dalam peraturan Kepmen Lingkungan Hidup no 49 tentang baku mutu getaran, getaran yang sudah memasuki kecepatan 4 mm/s pada frekuensi diatas 15 Hz berarti getaran tersebut kemungkinan akan merusak plesteran dinding pemikul [4].

Pada rumah pompa IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya diduga telah terjadi kerusakan pada struktur, pada sekitar area pompa terjadi retakan-retakan plesteran, namun perlu adanya analisa lebih lanjut, apakah kerusakan-kerusakan tersebut diakibatkan oleh getaran operasional mesin atau terjadi karena kualitas beton yang kurang baik, sehingga pada tugas akhir ini akan melakukan analisa pengaruh getaran pompa air terhadap struktur bangunan yang ada di IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat dirumuskan permasalahannya sebagai berikut:

a. Bagaimana mengetahui dampak getaran pompa terhadap kerusakan struktur bangunan di rumah pompa IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya?
b. Bagaimana mengetahui energi getar yang diterima struktur lain yang berasal dari sumber tanpa pengukuran secara langsung?
c. Bagaimana mengetahui besarnya energi getar yang dirambatkan dari suatu sistem pompa (sumber) ke struktur yang lain?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, maka tujuan dari tugas akhir ini adalah

a. Mengetahui besarnya kecepatan getar untuk menentukan dampak kerusakan terhadap struktur bangunan di rumah pompa IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya.
b. Mengetahui energi getar yang diterima struktur lain dengan pemodelan metematis.
c. Mengetahui besar *Transmissibility* pada sistem pompa untuk menganalisa besarnya energi getar yang dirambatkan dari suatu pompa (sumber) ke struktur yang lainnya.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari meluasnya permasalahan, maka batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah pada pemodelan matematis, pompa dianggap sebagai massa tergumpal.

1.5 Manfaat

Penelitian tugas akhir ini diharapkan mampu memberikan manfaat bagi penelitian selanjutnya dalam kalangan mahasiswa dan mampu membawa manfaat bagi industri untuk mendeteksi getaran serta dampak terhadap lingkungan.

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan laporan ini dilakukan secara sistematis dan tersusun dalam lima bab dengan penjelasan sebagai berikut,

BAB I Pendahuluan

Bab ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalahan, tujuan, batasan masalah, manfaat, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Pada bab ini dibahas teori-teori dasar yang menunjang dan terkait dengan tugas akhir ini.

BAB III Metodologi Percobaan

Pada bab ini dijelaskan mengenai tahapan-tahapan yang dilakukan dalam tugas akhir ini.

BAB IV Analisis Data dan Pembahasan

Pada bab ini dilakukan analisis data kemudian dilakukan pembahasan.

BAB V Penutup

Bab ini berisi tentang simpulan dari penelitian tugas akhir yang telah dilakukan dan saran untuk perbaikan penelitian selanjutnya.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Getaran Struktur

Getaran merupakan gerak bolak balik yang berulang dari bagian suatu benda atau mesin dari posisi setimbangnya pada selang waktu tertentu yang dapat terjadi pada sebuah sistem, masalah getaran terjadi apabila ada bagian-bagian ataupun sumber berputar yang mengenai peralatan ataupun bangunan struktur disekitar sumber getar, pada struktur yang memiliki sumber getar terus-menerus secara fungsi waktu, akan membawa dampak pada struktur yang ditopang dan sekaligus memiliki peluang perambatan getaran tersebut pada struktur disekitarnya. Secara alamiah getaran akibat operasional mesin, memiliki amplitudo getar yang rendah namun energi konstan. Untuk meredam dampaknya, pada mesin yang menjadi sumber getar tersebut ditempatkan pada pondasi beton. Beton bertulang rangka baja dapat menaikkan kekakuan (*stiffness*) dan redaman (*damping*) hingga 120%. Bila plester (pelindung rangka baja) pada beton telah terkelupas, maka fungsi redaman getaran akan turun 49% [1]. Secara umum, getaran pada lantai yang berfungsi sebagai pondasi mesin memiliki sifat meredam getaran yang ditimbulkan.

2.2 Koefisien Redaman

Redaman atau *damping* merupakan sebuah mekanisme yang mendisipasi energi getar pada sistem dinamik, parameter ini sangat penting dalam proses analisa getaran yang berada pada struktur. Dalam struktur perambatan energi ke lingkungan sekitar akan terjadi penurunan energi getar sehingga menjadi stabil bahkan diam ketika redaman yang diberikan tepat. Getaran yang terdapat pada struktur diketegorikan sebagai getaran periodik akibat getaran yang ditimbulkan oleh pompa, dengan amplitudo yang terjadi merupakan fungsi kekerasan dan kecepatan mesin. PPV kecepatan getar pada struktur merupakan salah satu parameter penting yang

paling tepat untuk mengevaluasi getaran yang terjadi mengganggu bangunan atau tidak, dengan persamaan PPV seperti 2.1 [5].

$$\mathrm{PPV} = 2\pi(\mathrm{f})(\mathrm{A}) \qquad (2.1)$$

dimana f merupakan frekuensi (CPS) dan A merupakan amplitudo (mm/s).

Amplitudo gelombang akan berkurang dengan bertambahnya jarak dari sumber getaran. Hubungan amplitudo dengan jarak ditentukan dengan persamaan 2.2 berikut:

$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} \qquad (2.2)$$

dimana r adalah jarak dari sumber ke titik ukur, sehingga dengan memasukkan redaman material, maka persamaan 2.2 akan menjadi persamaan 2.3 seperti berikut:

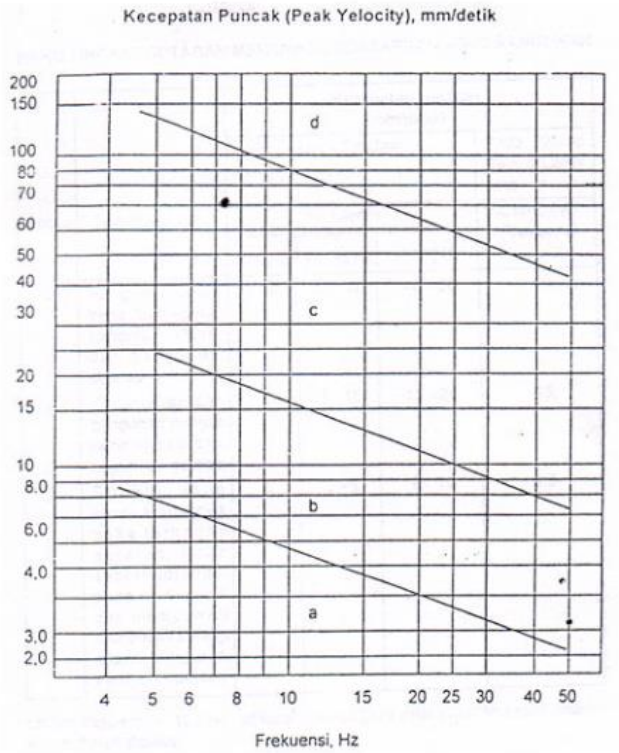
$$\frac{A_2}{A_1} = \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-\alpha(r_2 - r_1)} \qquad (2.3)$$

dimana:
A1 = *Peak particle velocity* pada jarak r1
A2 = *Peak particle velocity* pada jarak r2
r1 = Jarak dimana akan dihitung nilai A1 nya
r2 = Jarak referensi yang diketahui A2 nya
α = koefisien redaman

Dengan α adalah koefisien redaman, koefisien redaman atau koefisien *atenuasi* adalah koefisien pengurangan amplitudo dengan jarak yang tergantung pada jenis material dan frekuensi.

2.3 Kepmen LH No. 49 Tahun 1996 Tentang Baku Mutu Getaran

Pada keputusan menteri lingkungan hidup no 49 tahun 1996 tentang baku mutu getaran dijelaskan bahwa untuk menjamin kelestarian lingkungan hidup agar dapat bermanfaat bagi kehidupan maka perlu adanya upaya pengendalian pencemaran atau perusakan lingkungan, salah satunya tentang getaran terhadap dampak kerusakan pada bangunan, pada dokumen tersebut sudah diatur seberapa besar getaran dan dampak pada kerusakan struktur seperti Gambar 2.1 berikut



Gambar 2.1 Daerah Getar Terhadap Dampak Kerusakan [4]

Keterangan :

Kategori A : Tidak menimbulkan kerusakan

Kategori B : Kemungkinan keretakan plesteran (retak/terlepas plesteran pada dinding pemikul beban pada kasus khusus)

Kategori C : Kemungkinan rusak komponen struktur dinding pemikul beban

Kategori D : Rusak dinding pemikul beban

2.4 Kuat Tekan Beton

Dalam sebuah bangunan / konstruksi, beton adalah sebuah bahan bangunan komposit yang terbuat dari kombinasi agregat dan pengikat semen, beton sudah umum digunakan untuk bangunan gedung, jembatan, jalan dan lain-lain. Kekuatan beton sangat mempengaruhi kuat tidaknya bangunan tersebut, salah satu parameter yang harus diperhatikan adalah kuat tekan beton.

Kuat tekan beton adalah kemampuan beton menahan beban dibagi dengan luas permukaan beton sampai menyebabkan beton tersebut hancur apabila dibebani dengan gaya tertentu. Kuat tekan beton merupakan sifat terpenting dalam kualitas beton, kekuatan ini ditentukan oleh jenis material penyusunnya, seperti perbandingan semen, agregat kasar dan halus, air, bila semakin kuat tekan yang dihasilkan maka semakin tinggi kualitas beton tersebut

Cara mendapatkan nilai kuat tekan beton dengan menggunakan mesin uji yaitu memberikan beban desak bertingkat terhadap benda uji silinder beton sampai hancur, kuat tekan benda uji ditentukan oleh tegangan desak tertinggi pada saat regangan beton $\pm$ 0,002 yang dicapai beton uji berumur 28 hari [7]. Cara menentukan nilai kuat tekan beton seperti persamaan 2.4 berikut

$$f'_c = \frac{P}{A} \tag{2.4}$$

Dimana

f'_c : Kuat tekan Beton (Mpa)

A : Luas Penampang Benda uji (mm^2)

P : Kuat Desak mesin (N)

2.5 *Modulus Young*

Tolok ukur yang sering digunakan dari sifat elastis bahan adalah *modulus elastis*, yang merupakan perbandingan dari tekanan yang diberikan terhadap perubahan bentuk per satuan panjang, sebagai akibat dari tekanan yang diberikan [8]. *Modulus Young* beton akan berubah-ubah menurut kekuatan, *Modulus Young* juga tergantung pada umur beton, sifat-sifat dari agregat dan semen penyusun beton tersebut, jenis dan ukuran dari benda uji.

Untuk menentukan *Modulus Young* dari beton yang memiliki kapadatan normal dengan berat isi $\pm$ 23 kN/m^3 dapat digunakan persamaan seperti berikut [7].

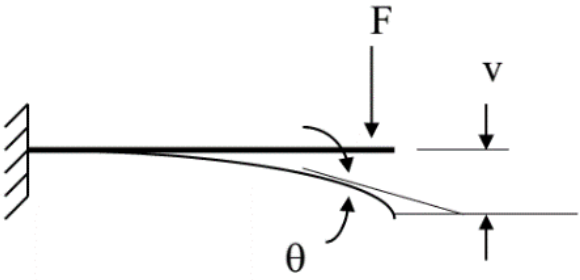
$$E = 4700\sqrt{f'_c} \tag{2.5}$$

Dengan
E = *Modulus Young* beton tekan (MPa)
f'_c = Kuat tekan Beton (Mpa)

2.6 Matriks Kekakuan *Beam*

Matriks kekakuan K berpengaruh pada gaya potong dan gaya kelengkungan dari *beam*. Pada Gambar 2.2, terlihat bahwa *beam* mengalami kedua gaya secara bersamaan yang menghasilkan defleksi dan rotasi. Untuk mengetahui besarnya defleksi dan rotasi dari *beam*, dapat dilihat pada matriks kekakuan lokal berikut ini.

$$\begin{Bmatrix} V1 \\ M1 \\ V2 \\ M2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta 1 \\ \theta 1 \\ \Delta 2 \\ \theta 2 \end{Bmatrix} \tag{2.6}$$



Gambar 2.2 Gaya yang Bekerja Pada *Beam* [9]

Dari matrik kekakuan lokal 2.13 tersebut, maka defleksi Δ dapat dicari untuk melihat respon dari *beam*, setelah K dihitung dari masing-masing *node*, diperoleh matriks kekakuan yang dapat digunakan untuk mengetahui defleksi, seperti persamaan berikut [9]:

$$\begin{Bmatrix} V1 \\ M1 \\ V2 \\ M2 \end{Bmatrix} = \left(\frac{EI}{L}\right) \begin{bmatrix} 12/L^2 & 6/L & -12/L^2 & 6/L \\ 6/L & 4 & -6/L & 2 \\ -12/L^2 & -6/L & 12/L^2 & -6/L \\ 6/L & 2 & -6/L & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta 1 \\ \theta 1 \\ \Delta 2 \\ \theta 2 \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

Dimana

E : *Modulus Young* material
I : *Momen Inersia* Batang
L : Panjang elemen
V : Gaya luar
M : Momen gaya
Δ : *Displacement*
Θ : Sudut simpangan

2.7 *Transmissibility*

Transmissibility merupakan rasio amplitudo gaya atau perpindahan getaran pada bantalan terhadap amplitudo gaya atau perpindahan pada mesin(input) [9]. Berikut merupakan fungsi umum prinsip *Transmissibility* :

$$T_r = \frac{Amplitudo\ gaya\ yang\ ditransmissikan}{Amplitudo\ gaya\ pada\ input} \tag{2.8}$$

Gaya yang dirambatkan ke pondasi dapat dikurangi dengan menggunakan peredam yang baik. Gaya yang dirambatkan ke pondasi adalah penjumlahan dari gaya pegas dan gaya dari *damper*. Dengan amplitudo yang dirambatkan ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$F_T = \sqrt{[(kx)^2 + (c\omega x)^2]} \tag{2.9}$$

Rumus untuk rasio *Transmissibility absolute*-nya ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$T_a = \frac{F_T}{F} = \frac{x\sqrt{(k)^2+(c\omega)^2}}{F} \tag{2.10}$$

$$X = \frac{F/_k}{\sqrt{(1-\left(\frac{\omega}{\omega o}\right)^2)^2+(2\zeta\frac{\omega}{\omega o})^2}} \tag{2.11}$$

$$T_a = \frac{\sqrt{(1+(2\zeta\frac{\omega}{\omega o})^2)}}{\sqrt{(1-\left(\frac{\omega}{\omega o}\right)^2)^2+(2\zeta\frac{\omega}{\omega o})^2}} \tag{2.12}$$

$$T_a = \frac{\sqrt{1+4\zeta^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}}{\sqrt{(1-(\frac{\omega}{\omega_0})^2)^2+4\zeta^2(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} \tag{2.13}$$

Rumus matematis koefisien peredam untuk sistem yang memiliki satu derajat kebebasan atau disebut *Single Degree of Freedom* (SDOF) ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$c = 2\xi\sqrt{k.m_{total}} \tag{2.14}$$

Nilai frekuensi natural, rasio redaman, dan rasio frekuensi dinyatakan pada persamaan (2.22), (2.23), dan (2.24).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_{total}}} \tag{2.15}$$

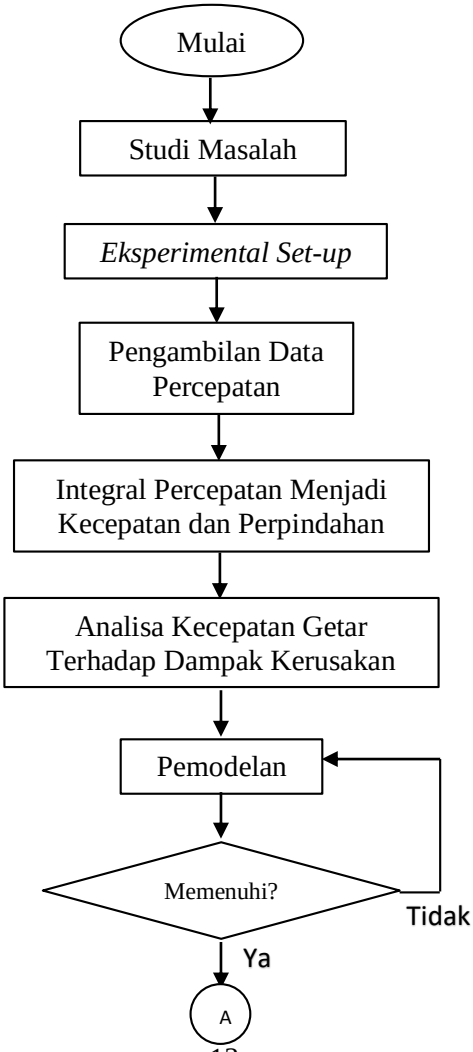
$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{k.m_{total}}} \tag{2.16}$$

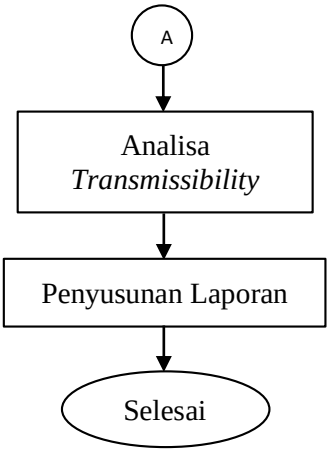
$$\mathrm{r} = \frac{\omega}{\omega_0} \tag{2.17}$$

dengan :
F_T = gaya yang *ditransmissikan* (N),
T_a = rasio *Transmissibility absolut* (dB),
ω = kecepatan putar (rad/s),
ω_o = frekuensi natural,
r = rasio frekuensi,
c = koefisien redaman (Ns/m),
k = *spring stiffness* (N/m),
m_{total} = massa total (kg),
x = *displacement* (m),
ξ = rasio redaman.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijabarkan metode yang disusun dan digunakan dalam penyelesaian permasalahan seperti pada gambar berikut:



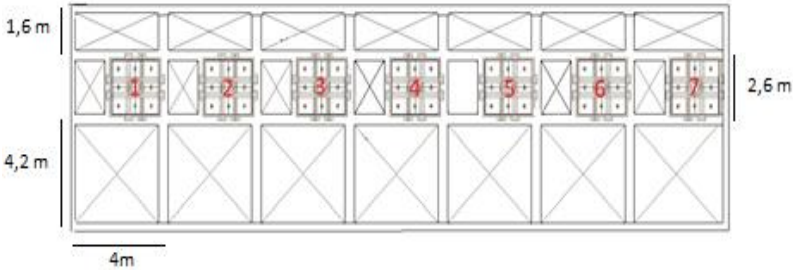


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

3.1 Objek Penelitian

Objek yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah 7 pompa di rumah pompa IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya. Dengan berat pompa 1 sampai 3 sebesar 19000 N dan pompa 4 sampai 7 memiliki berat 11000 N, kedua jenis pompa yang digunakan memiliki spesifikasi sama seperti berikut: Kapasitas 200 kW, Teganan 380/660 V, Arus 364.6 / 210.5 Amp dan kecepatan rotasi 990 RPM

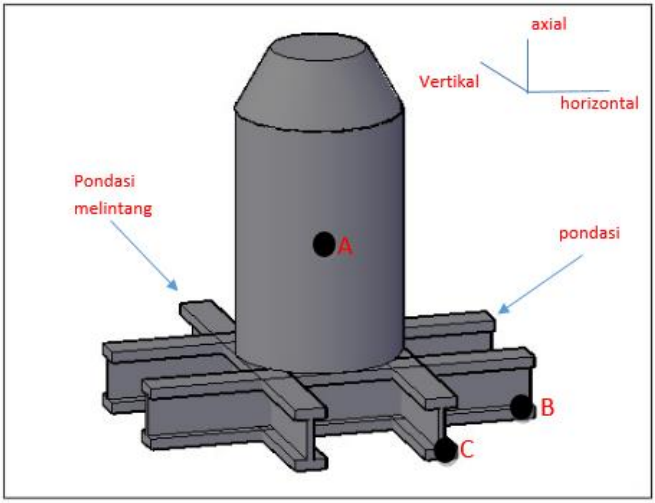
Gambar 3.2 7 Pompa IPAM Karangpilang III



Gambar 3.3 Letak Tujuh Pompa Tampak Atas

3.2 Pengambilan Data Getaran Pompa

Pompa air pada IPAM beroperasi pada kondisi normal, kecuali pompa dua sedang dalam keadaan tidak beroperasi. Data getaran diambil menggunakan *vibrometer National Instrument* dengan *accelerometer* yang diletakkan pada titik sumber (titik A), pondasi (titik B) dan pondasi melintang (titik C) dengan arah sumbu *axial, vertical dan horizontal* sesuai gambar berikut:



Gambar 3.4 Titik Sensor Pengukuran

Accelerometer dihubungkan dengan NI-DAQ 9171 yang berfungsi sebagai *Analog to Digital Converter* (ADC). Data yang diambil berupa percepatan getaran pada pompa pada titik-titik tersebut selama 10 detik.

3.3 Analisa Kecepatan Getar Terhadap Dampak Kerusakan

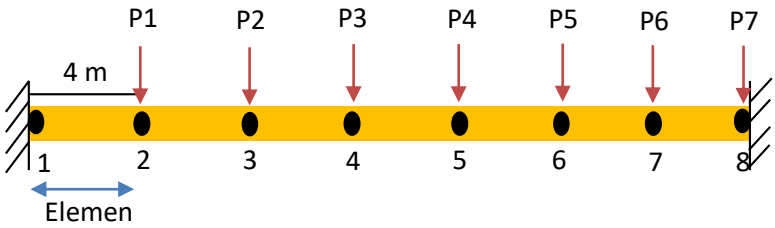
Integral satuan percepatan getar mm/s^2, menjadi satuan kecepatan getar mm/s dilakukan untuk mengetahui besarnya energi getar terhadap dampak kerusakan bangunan. Hasil data kecepatan getar digunakan untuk menganalisa daerah getar pompa, hasil kecepatan getar pompa dalam domain waktu dirubah menjadi domain frekuensi dengan menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT), yang kemudian dicari puncak-puncak pada satu kali RPM. Nilai puncak kecepatan getar dalam domain frekuensi dibandingkan dengan acuan daerah getar pompa yang didasarkan pada Kepmen Lingkungan Hidup no 49 tahun 1996 tentang baku getaran. Dokumen tersebut, ada 4 pembagian berdasarkan daerah getar terhadap kerusakan struktur, kategori A tidak menimbulkan kerusakan, kategori B kemungkinan keretakan plesteran (retak/terlepas plesteran pada dinding pemikul beban pada kasus khusus), kategori C kemungkinan rusak komponen struktur dinding pemikul beban dan kategori D rusak dinding pemikul beban.

Kemudian dilakukan analisa koefisien redaman untuk mengetahui seberapa besar penurunan energi getar dari sumber terhadap titik satu dan titik kedua, koefisien redaman ditentukan dari PPV kecepatan getar pada pondasi pompa dengan jarak R1 dan PPV kecepatan getar pada lantai dengan jarak R2, dengan menggunakan persamaan 2.4 sehingga didapatkan nilai koefisien redaman.

3.4 Pemodelan *Beam*

Prinsip *transmissibility* digunakan sebagai dasar pemodelan struktur penopang pompa. Pemodelan dilakukan dangan cara memisalkan sebuah beton penopang pompa menjadi sebuah *beam*. Struktur bangunan IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya

seperti Gambar 3.3 dimodelkan menjadi sebuah *beam* dimana terdapat beban seperti pada gambar berikut:



Gambar 3.5 Pemodelan *Beam* Struktur Bangunan Tampak Samping

Pada Gambar 3.5 terdapat tujuh elemen *beam* yang terbentang sepanjang 28.25 m dari *node* 1 sampai *node* 8 yang ditandai dengan bulat hitam, dimana kedua ujung *beam* tersebut saling terikat (*fixed support*), *beam* terdapat gaya tekan vertikal akibat beban pompa 1 (P1), pompa 2 (P2) dan pompa 3 (P3) sebesar 19000 N, dan pompa 4 (P4), pompa 5 (P5), pompa 6 (P6) sebesar 11000 N, sedangkan beban pompa 7 (P7) dapat diabaikan karena terdapat pada *node* 8 (*fixed support*)

3.5 *Transmissibility*

Prinsip *transmissibility* digunakan untuk mengetahui rasio gaya yang dirambatkan dibandingkan dengan gaya yang dihasilkan oleh pompa (sumber) tersebut sesuai dengan persamaan berikut:

$$T_r = \frac{Amplitudo\ gaya\ yang\ ditransmissikan}{Amplitudo\ gaya\ pada\ input}$$

Hasil pengukuran *displacement* pada pompa (sumber) dibandingkan dengan nilai *displacement* pengukuran pada pondasi dan pada *node* (beton), sehingga didapatkan nilai rasio *transmissibility* dari pompa ke beton (*node*), kemudian hasil pemodelan didapatkan nilai *displacement* disepanjang *beam*

sehingga dapat dicari nilai rasio *transmissibility* dari *node* satu ke yang lainnya.

3.6 Penyusunan Laporan

Langkah terakhir dari penelitian ini adalah penyusunan laporan penelitian. Laporan penelitian yang akan dibuat dimulai dari bab pendahuluan sampai dengan hasil dan kesimpulan. Dengan adanya buku laporan penelitian ini, diharapkan laporan penelitian ini dapat menunjang atau mendukung penelitian-penelitian selanjutnya mengenai getaran pada struktur untuk deteksi dampaknya dan perilaku perambatannya.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil analisa getaran pompa terhadap kerusakan bangunan di IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya, hipotesa awal mengenai terjadinya kerusakan pada struktur, perlu dideteksi apakah benar penyebab kerusakan dari getaran pompa atau disebabkan oleh kualitas beton yang kurang baik. Untuk dapat mencapai tujuan tersebut maka dilakukan beberapa langkah antara lain pengambilan data percepatan getar pompa di tiga titik, penurunan satuan dari percepatan getar menjadi kecepatan getar dan *displacment*, analisa daerah getar dan analisa koefisien redaman dari sumber terhadap pondasi lantai serta pemodelan struktur untuk mengetahui *transmissibility*, nilai *transmissibility* ini digunakan untuk mengetahui besarnya energi yang dirambatkan suatu sumber ke struktur bangunan yang lain, sehingga kualitas bangunan sebagai fungsi peredam getaran dapat diketahui.

4.1 Percepatan Getar

Pengambilan data percepatan getar dilakukan pada semua pompa. Nilai percepatan terbesar didapatkan dari nilai maksimal amplitudo selama pengambilan data, pada Tabel 4.1 diperoleh nilai PPV pada tiga titik pengukuran dengan sumbu arah *axial*, *vertical* dan *horizontal.*

Terdapat 7 buah pompa dengan keadaan normal beroperasi, kecuali pada pompa 2 sedang dalam keadaan mati sehingga tidak dilakukan pengambilan data, pada Tabel 4.1 nilai percepatan pompa 1 dan pompa 3 pada sumbu *axial* lebih tinggi dari sumbu *vertical* maupun *horizontal*, sedangkan pada pompa 4 sampai pompa 7 arah getaran pada sumbu *vertical* rata-rata lebih tinggi dari sumbu *axial* dan *horizontal*. Semakin besar nilai percepatan akan memperbesar energi getar yang akan disalurkan, sehingga nilai-nilai tertinggi ini akan menjadi acuan untuk analisa daerah getar.

Tabel 4.1 Nilai Maksimal Percepatan (mm/s^2)

Titik ukur	Percepatan (mm/s^2)		
	axial	*vertical*	*horizontal*
pompa1_Sumber	2,633	2,012	1,301
pompa1_pondasi	0,926	0,380	0,518
pompa3_Sumber	6,257	2,400	1,104
pompa3_pondasi	0,883	0,411	0,565
pompa3_pondasi melintang	0,816	0,449	0,610
pompa4_Sumber	3,070	2,248	2,134
pompa4_pondasi	0,309	0,352	0,435
pompa4_pondasi melintang	0,334	0,838	0,513
pompa5_Sumber	1,607	2,716	1,957
pompa5_pondasi	0,541	1,064	0,980
pompa5_pondasi melintang	1,013	0,795	0,939
pompa6_Sumber	1,627	2,145	0,843
pompa6_pondasi	0,277	0,172	0,339
pompa6_pondasi melintang	0,392	0,396	0,307
pompa7_pompa	1,769	1,031	1,425
pompa7_pondasi	0,717	0,857	1,194
pompa7_pondasi melintang	0,392	1,072	0,471

4.2 Kecepatan Getar Terhadap Dampak Kerusakan

Nilai *Peak Particle Velocity* (PPV) yang didapat dengan menurunkan satuan dari percepatan getar menjadi kecepatan getar partikel dalam bentuk domain waktu yang kemudian dirubah menjadi domain frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform* (FFT), sehingga diperoleh nilai seperti Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Nilai *Peak Particle Velocity* (PPV)

titik ukur	PPV (mm/s)		
	sumber	pondasi	pondasi melintang
pompa 1	3,3	2,5	Tidak diambil
pompa 3	5,6	4,95	3,11
pompa 4	4,6	4,67	1,53
pompa 5	2,1	0,6	0,71
pompa 6	1,64	0,27	0,18
pompa 7	1,99	1,04	0,53

Tabel 4.2 menunjukkan nilai PPV yang diperoleh untuk menentukan dampak kerusakan akibat getaran pompa, penentuan dampak kerusakan disesuaikan dengan Kepmen Lingkungan Hidup no 49 tahun 1996 tentang baku mutu tingkat getaran. Nilai PPV tersebut berada pada frekuensi 16,48 Hz seperti di lampiran B, sehingga pada pompa 1, pompa 5, pompa 6 dan pompa 7 masih berada pada kategori A dengan nilai PPV kurang dari 4 mm/s. Sedangkan pada pompa 3 dan pompa 4 nilai PPV sudah berada pada kondisi kategori B dengan nilai lebih dari 4 mm/s, seperti Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Baku Tingkat Getaran Terhadap Dampak Kerusakan [4]

GETARAN		FREKUEN	BATAS GERAKAN PEAK (mm/detik)			
Parameter	Satuan	SI (Hz)	Kategori A	Kategori B	Kategori C	Kategori D
- Kecepatan Getaran	mm/detik	4	< 2	2 - 27	> 27-40	> 140
		5	<7,5	< 7,5-25	> 24-130	> 130
- Frekuensi	Hz	6,3	< 7	< 7-21	> 21-110	> 110
		8	< 6	< 6-19	> 19-100	> 100
		10	< 5,2	< 5,2-16	> 16-90	> 90
		12,5	< 4,8	< 4,8-15	> 15- 80	> 80
		16	< 4	< 4-14	> 14-70	> 70
		20	< 3,8	< 3,8-12	> 12-67	> 67
		25	< 3,2	< 3,2-10	> 10-60	> 60
		31,5	< 3	< 3-9	> 9-53	> 53
		40	< 2	< 2-8	> 8-50	> 50
		50	< 1	< 1-7	> 7-42	> 42

Sehingga pada pompa 3 dan 4 dipastikan termasuk kedalam daerah getar kategori B dengan dampak dapat merusak plesteran bangunan.

4.3 Kuat Tekan Beton

Pengambilan sampel silinder beton dilakukan oleh tim dari Diploma Teknik Sipil ITS dengan cara *core dril* pada area pondasi lantai sebanyak 5 buah sampel. Lokasi pengambilan benda uji silinder beton dilakukan di IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya dengan titik *core dril* dapat dilihat pada lampiran C, sedangkan tempat pengujian kuat tekan beton dilakukan di Laboratorium. Setelah dilakukan pengujian kuat tekan beton didapatkan hasil seperti Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Hasil Kuat Tekan Beton

Uraian	unit	1	2	3	4	5
Kode		C1	C2	C4	C8	C12
Diameter, Ø	mm	100	100	100	100	100
Tinggi, L	mm	100	100	100	150	100
Berat	gr	1781	1789	1752	2830	1804
Berat jenis	ton/ m^3	2.27	2.28	2.23	2.40	2.30
Beban Tekan, P	ton	18.4	16.5	16.3	12.2	23.9
Luas A	mm^2	7850	7850	7850	7850	7850
f'c = P / A (silinder) f'c	MPa	22.99	20.62	20.37	15.25	29.87

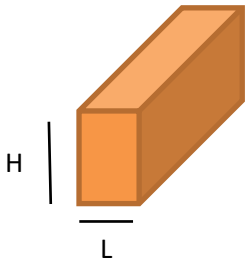
Hasil pengujian benda uji silinder beton yang diambil dengan *Core Drill* pada lantai menunjukan bahwa benda uji silinder beton C8 mempunyai nilai kuat tekan terendah sebesar $f'_{c\text{-min}}$ = 15,25 MPa, benda uji silinder beton C12 mempunyai nilai kuat tekan tertinggi sebesar $f'_{c\text{-mak}}$ = 29,87 Mpa. Hasil kuat tekan beton ini untuk mendapatkan nilai *modulus young* dari sebuah beton dengan menggunakan persamaan 2.5.

4.4 Pemodelan Matematis

Pemodelan *beam* pada Gambar 3.5 terdapat tujuh elemen *beam* dimana masing-masing elemen dibatasi dengan *node*, berikut merupakan matrix kekakuan tiap elemen *beam* [9]:

$$(K) = \begin{pmatrix} \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \\ -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \end{pmatrix}$$

Dengan E merupakan *Modulus Young*, I merupakan *Momen Inersia* dan L merupakan panjang elemen. *Modulus young* didapatkan dengan menggunakan persamaan 2.5, sehingga diperoleh nilai parameter *Modulus young* sebesar 2,12.10^11 N/m^2. Untuk menghitung nilai *momen inersia* digunakan langkah-langkah sebagai berikut:



Gambar 4.1 Gambar *Beam* Tampak Depan

Dari Gambar 4.1 diperoleh nilai *momen inersia* sebesar 0,0011 m^4, dengan lebar beton L= 0,4 m dan tinggi beton H=0,7 m. *Momen inersia* diperoleh dari persamaan sebagai berikut:

$$I = \frac{1}{12} \times L \times H^3$$

Dengan menggabungkan matrik setiap elemen menjadi sebuah matrik kekakuan global seperti pada lampiran D. Berikut hasil perhitungan *displacement*, sudut simpangan, gaya reaksi dan momen gaya dengan gaya P oleh masing-masing pompa.

$$\begin{pmatrix} P1 \\ M1 \\ P2 \\ M2 \\ P3 \\ M3 \\ P4 \\ M4 \\ P5 \\ M5 \\ P6 \\ M6 \\ P7 \\ M7 \\ P8 \\ M8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 52000 \\ 26532 \\ -18999 \\ 2.8160e\text{-}14 \\ -19000 \\ 7.7440e\text{-}15 \\ -19000 \\ -6.75840e\text{-}14 \\ -10999 \\ 4.2239e\text{-}15 \\ -11000 \\ 4.2239e\text{-}14 \\ -10999 \\ -3.3216e\text{-}14 \\ 37995 \\ -254522 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \Delta 1 \\ \Phi 1 \\ \Delta 2 \\ \Phi 2 \\ \Delta 3 \\ \Phi 3 \\ \Delta 4 \\ \Phi 4 \\ \Delta 5 \\ \Phi 5 \\ \Delta 6 \\ \Phi 6 \\ \Delta 7 \\ \Phi 7 \\ \Delta 8 \\ \Phi 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.00055 \\ -0.00022 \\ -0.00151 \\ -0.00021 \\ -0.0021 \\ -0.00007 \\ -0.0020 \\ 0.00010 \\ -0.00138 \\ 0.00021 \\ -0.00051 \\ 0.00020 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Keterangan:
Δ = Displacement (m)
Θ = Sudut simpangan (derajat)
P = Gaya Berat Pompa (N)
M = Momen gaya(Nm)

Displacement dan sudut simpangan pada *node* 1 dan *node* 8 bernilai nol karena pada *node* tersebut memiliki tumpuan yang tidak dapat bergerak karena menyatu dengan dinding (*fixed support)*. Semua *displacement* bernilai negatif yang menyatakan bahwa *displacement* ke arah sumbu z negatif. Dari hasil tersebut diperoleh nilai *displacement* pada setiap *node*, *displacement* paling rendah sebesar 0,5 mm yaitu pada *node* 7, sehingga pada semua titik di sepanjang balok beton sudah melebihi batas yang diijinkan yaitu maksimal sebesar 0,5 mm (lampiran F) [10], maka struktur bangunan tersebut perlu adanya penguatan pada struktur penopang pompa.

4.5 *Transmissibility*

Transmissibilty merupakan rasio amplitudo gaya atau *displacement* getaran pada bantalan terhadap amplitudo gaya atau *displacement* pada mesin(input) seperti persamaan 2.8. Nilai *displacement* didapatkan dari hasil pengukuran secara langsung dan dengan pemodelan matematis seperti di subbab 4.4, dengan perbandingan hasil *displacement* seperti berikut:

Tabel 4.5 Perbandingan Hasil *Displacement*

Node	*Displacement* Pengukuran (mm)	*Displacement* Pemodelan (mm)	
		E=2,56	E=1,83
4	1,2	2,1	2,9
5	1,1	2	2,8

Pada Tabel 4.5 nilai yang diperoleh hanya pada *node* 4 dan 5, dikarenakan pengambilan data lapangan hanya dilakukan pada *node* yang terkena sumber getar paling tinggi yaitu akibat getaran

pompa 3 dan pompa 4. Pada *displacement* pemodelan didapatkan nilai dengan variasi *modulus young* berbeda. *Modulus young* didapatkan dari persamaan 2.5 dengan kuat tekan beton yang paling besar dan kuat tekan beton yang paling kecil pada Tabel 4.4. Kuat tekan beton yang paling besar yaitu sebesar 29,87 Mpa menghasilkan nilai *displacement* mendekati nilai *displacemen*t pengukuran, sedangkan kuat tekan beton yang paling kecil yaitu sebesar 15,25 Mpa menghasilkan nilai *displacement* pemodelan yang semakin besar dan semakin jauh dengan *displacement* pengukuran.

Nilai *displacement* digunakan untuk mengukur besarnya nilai *transmissibility*. Nilai *transmissibility* dihitung dari titik acuan pompa 3 ke *node* 4, karena sumber getar pompa 3 memiliki nilai getaran yang paling besar dibandingkan dengan pompa yang lain. Nilai *transmissibility* didapatkan dengan pengukuran secara langsung pada pompa 3 (sumber), pondasi pompa 3 dan pada *node* 4. Dengan menggunakan persamaan 2.8, nilai *transmissibility* didapatkan seperti tabel berikut:

Tabel 4.6 Hasil *Transmissibility*

pompa	*Diplacement (m)*			*Transmissibility*	
	sumber	pondasi	*node*	Sumber-pondasi	*pondasi-node*
3	0,0021	0,0014	0,0012	0,68	0,85
4	0,0031	0,0015	0,0011	0,49	0,79

Nilai pada Tabel 4.6 didapatkan dengan pengukuran secara langsung dari nilai percepatan yang kemudian dilakukan integral untuk mendapatkan kecepatan getar dan integral kecepatan getar untuk mendapatkan nilai *displacement*. Kolom yang paling kiri merupakan acuan sumber pompa yang digunakan, kemudian diperoleh nilai *displacement* pada sumber pompa 3, *displacement* pada pondasi pompa 3 dan *displacement* pada *node* 4, sehingga dapat diketahui bahwa besar energi yang dirambatkan dari pompa

3 (sumber) ke pondasi dengan jarak 0,7 m sebanyak 68% dan energi yang dirambatkan dari pondasi ke *node* dengan jarak 1 m sebanyak 85 %, sehingga energi dari pompa (sumber) untuk sampai ke *node* masih banyak yang dirambatkan.

Kemudian untuk mengetahui energi yang dirambatkan dari sumber pompa 3 kebangunan sekitar dapat menggunakan nilai *displacement* hasil pemodelan pada subbab 4.4, nilai *displacement* pada *node* 4 dibandingkan dengan nilai *displacement* pada *node* yang lain, maka nilai rasio *transmissibility* dari energi yang dirambatkan dari sumber ke titik yang lain sebagai berikut:

Tabel 4.7 Rasio *Transmissibility* Berdasarkan Nilai Pemodelan Matematis

Node	*Displacement* Pemodelan (mm)	Rasio *Transmissibility*
1	0	0
2	0,5	0,26
3	1,5	0,71
4	2,1	1
5	2	0,95
6	1,3	0,62
7	0,5	0,23
8	0	0

Pada Tabel 4.7 kolom yang paling kiri merupakan representasi dari *nod*e seperti Gambar 3.5, pada kolom kedua nilai *displacement* pemodelan didapatkan dari subbab 4.4 dan nilai rasio *transmissibility* didapatkan dengan membandingkan nilai *displacement* pada setiap *node* dengan *displacement* acuan pada *node* 4 akibat pompa 3 dengan persamaan 2.8. sehingga energi yang dirambatkan dari *node* 4 ke *node* 7 dengan jarak sejauh 12 m sebesar 23% energi sumber dan akan habis pada *node* 8. Oleh

karena itu, jika *displacement* dari sumber pompa 3 sebesar 1,7 mm, maka *displacement* yang akan sampai pada *node* 7 sebesar 0,25 mm, sehingga pada *node* tersebut masih dibawah batas maksimal yang ditentukan yaitu kurang dari 0,5 mm (lampiran F) [10].

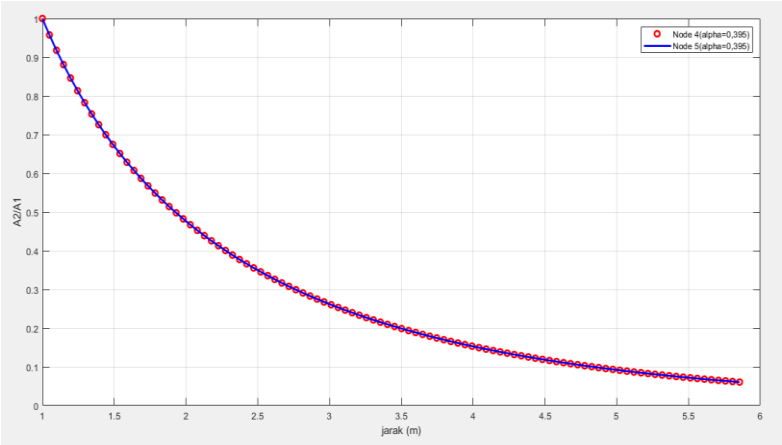
4.6 Nilai Koefisien Redaman

Nilai koefisien redaman adalah koefisien pengurangan amplitudo kecepatan getar dengan jarak yang tergantung pada jenis material dan frekuensi. Nilai *Peak Particel Velocity* (PPV) yang diambil tidak pada semua pondasi lantai, didasarkan pada nilai kecepatan getar yang diatas 4 mm/s, sehingga pengambilan data PPV hanya pada pondasi lantai pompa 3 (*node*4) dan pondasi pompa 4 (*node* 5). Dari nilai PPV pondasi sumber pompa sebagai titik 1 dan PPV *node* sebagai titik 2 maka diperoleh nilai koefisien redaman dengan menggunakan persamaan 2.3 sebagai berikut:

Tabel 4.8 Nilai Koefisien Redaman

Titik	PPV pondasi (A1) mm/s	PPV *node* (A2) mm/s	koef redaman (N/m)
Node 4	4,95	2,63	0,395
Node 5	4,67	2,23	0,395

Tabel 4.8 pada kolom pertama merepresentasikan titik pengambilan data yaitu pada *node* 4 dan *node* 5 seperti Gambar 3.5, kolom kedua dan ketiga merupakan nilai *Peak Particle Velocity* (PPV) yang didapatkan dari jarak pondasi A1 terhadap sumber sejauh 1 m, dan jarak *node* terhadap sumber sejauh 1,7 m, nilai koefisen redaman didapatkan dari persamaan 2.3 dengan hasil sebesar 0,39 (N/m), dengan nilai redaman tersebut maka beton sudah kehilangan fungsi redaman, dan plester pada beton terindikasi sudah mengalami kerusakan [1]. jika nilai PPV A2/A1 divariasikan terhadap jarak, maka didapatkan nilai rasio pengurangan puncak kecepatan getar terhadap jarak seperti Gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2 Rasio Pengurangan Amplitudo Terhadap Jarak

Pada Gambar 4.2 menunjukkan pengurangan rasio nilai PPV terhadap penambahan jarak, bulat merah merupakan rasio pengurangan puncak kecepatan getar pada titik 1 dan titik 2 di *node* 4 dari pompa 3 terhadap jarak. Sedangkan garis biru merupakan rasio pengurangan puncak kecepatan getar pada *node* 5 akibat dari pompa 4, gambar tersebut menunjukkan grafik *exponensial* dimana semakin jauh titik ukur dari sumber maka nilai perbandingan PPV 1 dibanding PPV 2 semakin mendekati nilai nol. Sehingga pada jarak 1,7 m getaran tinggal 50%, dan pada jarak 3,5 m getaran tinggal 25%.

4.7 Pembahasan

Dari hasil analisa data, dapat diketahui bahwa nilai kecepatan getar yang paling tinggi dihasilkan oleh pompa 3 dan pompa 4 yaitu lebih dari 4 mm/s pada frekuensi 16,5 Hz (1 RPM) dimana pada nilai ini kecepatan getaran pompa akan memberikan dampak terhadap bangunan, pada baku mutu getaran yang dikeluarkan oleh Kepmen Lingkungan Hidup no 49 tahun 1996 bahwa pada frekuensi 16 Hz kecepatan getar yang melebihi 4 mm/s akan memberikan dampak berupa rusaknya plesteran pada pelindung beton, hal ini akan mengurangi fungsi beton sebagai peredam

sampai 49 %. Sedangkan untuk pompa 1, pompa 5, pompa 6 dan pompa 7, kecepatan getar pompa masih berada dibawah 4 mm/s sehingga masih aman untuk struktur bangunan. Kemudian dilakukan pemodelan matematis untuk mengetahui besarnya penurunan pondasi penopang pompa.

Hasil pemodelan matematis menunjukkan bahwa *displacement* disepanjang balok beton penopang sudah mengalami penurunan pondasi dimana diketahui dari nilai *displacement* paling kecil sebesar 0,5 mm, sehingga pada semua titik di sepanjang balok beton sudah melebihi batas yang diijinkan yaitu maksimal penurunan sebesar 0,5 mm (lampiran F) [10], maka struktur bangunan tersebut perlu adanya penguatan pada struktur penopang pompa. Kualitas sebuah beton penopang juga dapat ditentukan dengan besarnya energi yang dirambatkan dari sebuah sumber getar, semakin besar energi yang dirambatkan maka kemampuan beton untuk meredam getaran sangat kurang.

Dari hasil nilai koefisien redaman didapatkan beton mempunyai fungsi redaman sebesar 39%, dengan nilai redaman tersebut maka beton sudah kehilangan fungsinya sebagai peredam getaran. Hal ini sesuai karena pada pompa 3 sebagai sumber getar yang paling tinggi kecepatan getarnya akan memberikan dampak terhadap bangunan berupa kerusakan pada area pondasi pompa yaitu adanya retakan-retakan pada plester beton, sedangkan plester beton memberikan pengaruh yang signifikan, jika masih dalam keadaan baik, plester beton mampu meredam hingga 120% dan jika plester sudah rusak redaman tinggal 49% [1]. Fungsi redaman pada beton juga akan mempengaruhi seberapa besar energi yang akan dirambatkan oleh sumber ke bangunan yang ada disekitarnya.

Dari hasil pengukuran *displacement* secara langsung dapat diketahui bahwa besar energi yang dirambatkan dari pompa 3 (sumber) ke pondasi dengan jarak 0,7 m sebanyak 68% dan energi yang dirambatkan dari pondasi ke *node* dengan jarak 1 m sebanyak 85 %, sehingga energi dari pompa (sumber) untuk sampai ke *node* masih banyak yang dirambatkan. Sedangkan energi yang dirambatkan dari *node* 4 ke *node* 7 dengan jarak sejauh 12 m sebesar 23% energi sumber dan akan habis pada *node* 8. Oleh

karena itu, jika *displacement* dari sumber pompa 3 sebesar 1,7 mm, maka *displacement* yang akan sampai pada *node* 7 sebesar 0,25 mm, sehingga pada jarak 12,7 m dari sumber getar, bisa dikatakan aman karena *displacement* tidak melebihi batas 0,5 mm.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

a. Nilai kecepatan getar yang paling besar dihasilkan oleh pompa 3 dan pompa 4 dengan nilai PPV lebih dari 4 mm/s pada frekuensi 16,5 Hz (1 RPM), sehingga pompa 3 dan 4 dapat memberikan dampak kerusakan terhadap struktur berupa rusaknya plester bangunan.
b. Hasil perbandingan *displacement* antara model matematik (elemen hingga) dan pengukuran secara langsung, diperoleh hasil bahwa nilai *modulus young* mempengaruhi besarnya nilai *displacement* pemodelan, semakin besar nilai *modulus young* akan menghasilkan nilai *displacement* yang mendekati pengukuran secara langsung.
c. Besar energi getar yang dirambatkan oleh sumber pompa 3 (nilai kecepatan getar yang paling besar) kepondasi pompa sebesar 68% dan energi yang dirambatkan dari pondasi ke struktur bangunan (*node 4*) sebesar 85%. Dari pemodelan diperoleh nilai *displacement* pada setiap titik, sehingga didapatkan bahwa energi yang dirambatkan dari *node* 4 ke *node* 7 dengan jarak sejauh 12 m sebesar 23% energi dari *node*.

5.2 Saran

Penulis memberikan saran untuk pengembangan penelitian lebih lanjut yaitu pemodelan dapat menggunakan *modulus young* dari kuat tekan beton yang lain, sehingga dapat menggunakan *modulus young* yang berbeda.

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

[1] S. S. VSS-SN640-312, “effect of vibration on construction,” 1992.

[2] detik.com, “komsumsi air disurabaya tertinggi dari rata-rata nasional,” 03 april 2017. [Online]. Available: https://news.detik.com/berita-jawa-timur/d-3463712/konsumsi-air-di-kota-surabaya-tertinggi-dibandingkan-nasional.

[3] B. C.F, Structural Vibration : Analysis and Damping, Butterworth Heinemann, 1996.

[4] L. Kepmen, KEP-49/MENLH/11/1996, Baku Tingkat Getaran, 1996.

[5] A. S. Sidharta, “Pengaruh Getaran Akibat Kendaran Dijalan Tol Terhadap Lingkungan Sekitar”.

[6] I. Dipohusodo, “Struktur Beton Bertulang,” PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1996.

[7] L. Murdock, “Bahan dan Praktek Beton,” Erlangga, Jakarta, 1986.

[8] Y. Susatio, Dasar-dasar Metode Elemen Hingga, Yogyakarta: Andi, 2004.

[9] Rao, Mechanical Vibration 5th Edition, University of Miami: Prentice Hall, 2004.

[10] P. A. K. Persero, “INSTRUCTION AND OPERATING MANUAL”.

[11] M. Srbulov, Ground Vibration Engineering, London: Springer, 2010.

[12] C. Mercer, “Acceleration, Velocity and Displacment Spectra - Omega Arithmetic,” November 2006.

[13] Anonim, “Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran

Beton Normal (SK," Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Banguna, Bandung, 1990.

[14] Anonim, "Metode Pengujian Modulus Elastisitas Statis Dan Rasio Poison," yayasan Badan Penerbit Pekerjaan Umum, Jakarta, 1996.

[15] K. Tjokrodimuljo, "Teknologi Beton," Teknik Sipil UGM, Yogyakarta, 1986.

[16] P. Hagedorn, Vibration and Waves in Continuos Mechanical System, London: Wiley, 2007.

[17] J. S. Lamancusa, "Vibration and Noise Control," 2002.

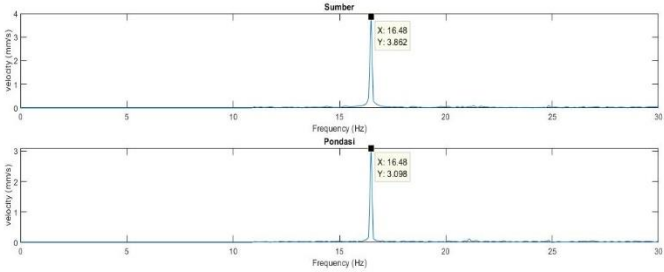
LAMPIRAN A

Spesifikasi Pompa di IPAM Karangpilang III PDAM Surabaya

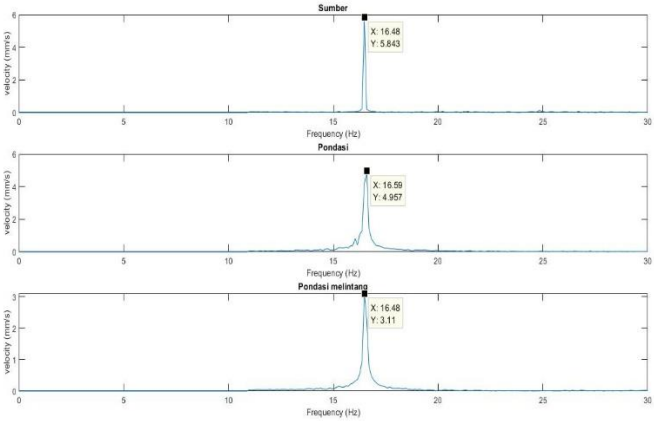
Jenis pompa : Pompa sentrifugal
Model pompa : CDM 450 HN
RPM : 990
Massa pompa 1,2 & 3 : 1900 kg
Massa pompa 4,5,6 & 7 : 1100 kg

Gambar 1. Spesifikasi Pompa 1

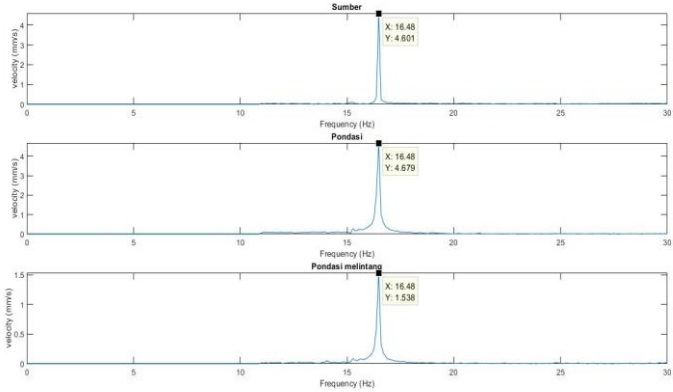
LAMPIRAN B



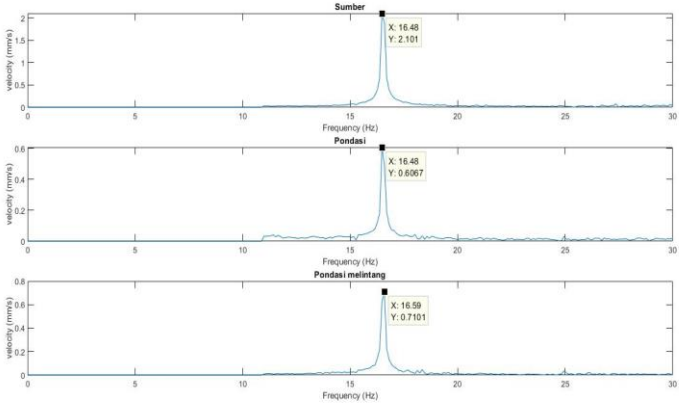
Gambar 1. Peak velocity Pompa 1



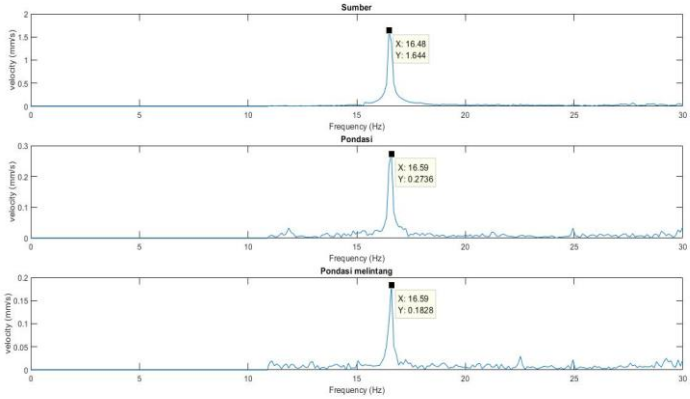
Gambar 3. Peak velocity Pompa 3



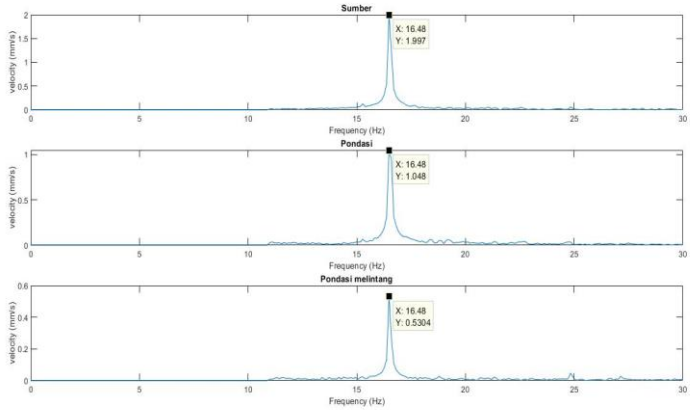
Gambar 4. Peak velocity Pompa 4



Gambar 5. Peak velocity Pompa 5



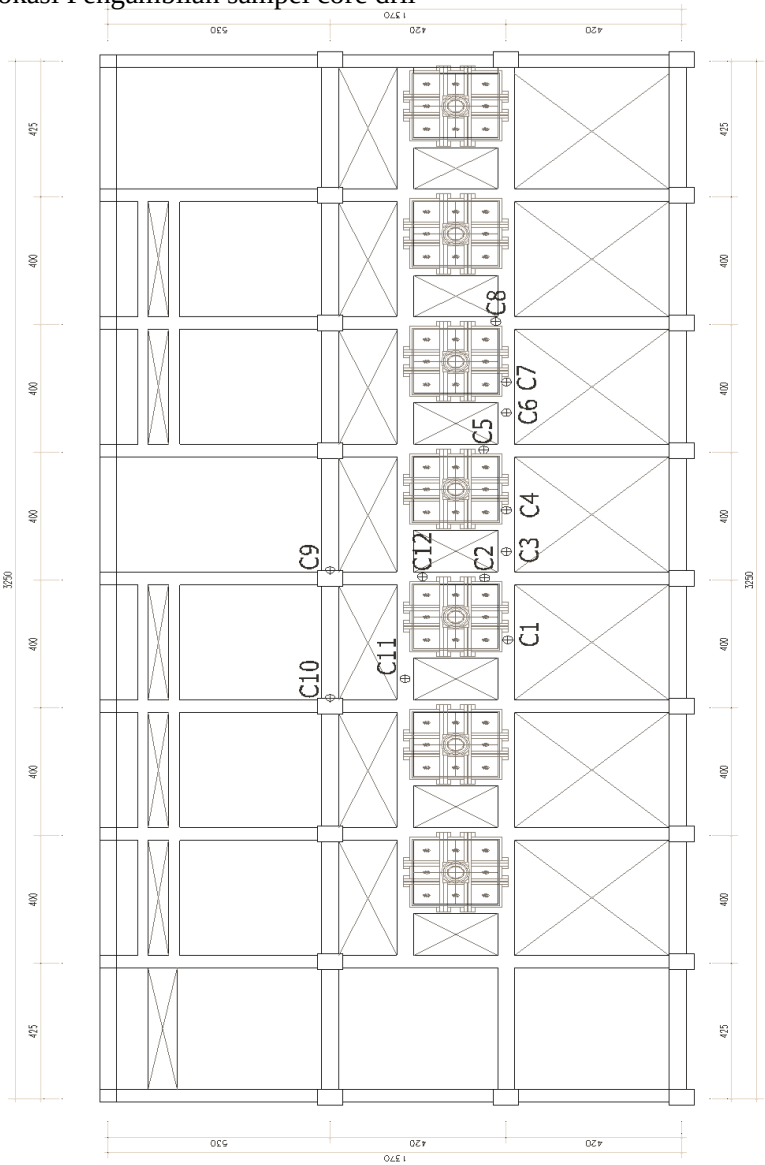
Gambar 6. Peak Velocity Pompa 6



Gambar 7. Peak Velocity Pompa 7

LAMPIRAN C

Lokasi Pengambilan sampel core dril



LAMPIRAN D

Pemodelan matematis dengan E=2,56.10^{11}

$I := 0.011 \qquad E := 2.56 \cdot 10^{11}$

$L1 := 4 \qquad L2 := 4 \qquad L3 := 4 \qquad L4 := 4$

$L5 := 4 \qquad L6 := 4 \qquad L7 := 4.25$

Matrik setiap elemen

$$(K) = \begin{pmatrix} \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \\ -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \end{pmatrix}$$

Sehingga didapatkan nilai seperti berikut

- Elemen 1 berbatas node 1 dan node 2

$$K1 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 2 & 2 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} & -5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} \\ -5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} & 5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{array}$$

- Elemen 2 berbatas node 2 dan node 3

$$K2 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 2 & 2 & 3 & 3 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} & -5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} \\ -5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} & 5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 2 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \end{array}$$

- Elemen 3 berbatas node 3 dan node 4

$$K3 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 3 & 3 & 4 & 4 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} & -5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} \\ -5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} & 5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 3 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \end{array}$$

- Elemen 4 berbatas node 4 dan node 5

$$K4 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 4 & 4 & 5 & 5 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} & -5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} \\ -5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} & 5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 4 \\ 4 \\ 5 \\ 5 \end{array}$$

- Elemen 5 berbatas node 5 dan node 6

$$K5 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 5 & 5 & 6 & 6 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} & -5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} \\ -5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} & 5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 5 \\ 5 \\ 6 \\ 6 \end{array}$$

- Elemen 6 berbatas node 6 dan node 7

$$K6 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 6 & 6 & 7 & 7 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} & -5.28 \times 10^{8} & 1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} \\ -5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} & 5.28 \times 10^{8} & -1.056 \times 10^{9} \\ 1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 6 \\ 6 \\ 7 \\ 7 \end{array}$$

- Elemen 7 berbatas node 7 dan node 8

$$K7 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 7 & 7 & 8 & 8 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 4.677 \times 10^{8} & 9.939 \times 10^{8} & -4.677 \times 10^{8} & 9.939 \times 10^{8} \\ 9.939 \times 10^{8} & 2.816 \times 10^{9} & -9.939 \times 10^{8} & 1.408 \times 10^{9} \\ -4.677 \times 10^{8} & -9.939 \times 10^{8} & 4.677 \times 10^{8} & -9.939 \times 10^{8} \\ 1.056 \times 10^{9} & 1.408 \times 10^{9} & -1.056 \times 10^{9} & 2.816 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 7 \\ 7 \\ 8 \\ 8 \end{array}$$

Matrik Kekakuan Global 7 Elemen

$$
\begin{pmatrix} P1 \\ M1 \\ P2 \\ M2 \\ P3 \\ M3 \\ P4 \\ M4 \\ P5 \\ M5 \\ P6 \\ M6 \\ P7 \\ M7 \\ P8 \\ M8 \end{pmatrix}
=
\left(\begin{array}{cccccc|cccccccc|cc}
5.28\times10^{8} & 1.056\times10^{9} & -5.28\times10^{8} & 1.056\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1.056\times10^{9} & 2.816\times10^{9} & -1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-5.28\times10^{8} & -1.056\times10^{9} & 1.056\times10^{9} & 0 & -5.28\times10^{8} & 1.056\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 5.632\times10^{9} & -1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\hline
0 & 0 & -5.28\times10^{8} & -1.056\times10^{9} & 1.056\times10^{9} & 0 & -5.28\times10^{8} & 1.056\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 5.632\times10^{9} & -1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -5.28\times10^{8} & -1.056\times10^{9} & 1.056\times10^{9} & 0 & -5.28\times10^{8} & 1.056\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 5.632\times10^{9} & -1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.28\times10^{8} & -1.056\times10^{9} & 1.056\times10^{9} & 0 & -5.28\times10^{8} & 1.056\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 5.632\times10^{9} & -1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.28\times10^{8} & -1.056\times10^{9} & 1.056\times10^{9} & 0 & -5.28\times10^{8} & 1.056\times10^{9} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 5.632\times10^{9} & -1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.28\times10^{8} & -1.056\times10^{9} & 9.957\times10^{8} & -6.212\times10^{7} & -4.677\times10^{8} & 9.939\times10^{8} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & -6.212\times10^{7} & 5.632\times10^{9} & -9.939\times10^{8} & 1.408\times10^{9} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.677\times10^{8} & -9.939\times10^{8} & 4.677\times10^{8} & -9.939\times10^{8} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.056\times10^{9} & 1.408\times10^{9} & -1.056\times10^{9} & 2.816\times10^{9}
\end{array}\right)
\cdot
\begin{pmatrix} \Delta 1 \\ \Phi 1 \\ \Delta 2 \\ \Phi 2 \\ \Delta 3 \\ \Phi 3 \\ \Delta 4 \\ \Phi 4 \\ \Delta 5 \\ \Phi 5 \\ \Delta 6 \\ \Phi 6 \\ \Delta 7 \\ \Phi 7 \\ \Delta 8 \\ \Phi 8 \end{pmatrix}
$$

Hasil *displacement* pada masing-masing *node* sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} P1 \\ M1 \\ P2 \\ M2 \\ P3 \\ M3 \\ P4 \\ M4 \\ P5 \\ M5 \\ P6 \\ M6 \\ P7 \\ M7 \\ P8 \\ M8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 52000 \\ 26532 \\ -18999 \\ 2.8160e\text{-}14 \\ -19000 \\ 7.7440e\text{-}15 \\ -19000 \\ -6.75840e\text{-}14 \\ -10999 \\ 4.2239e\text{-}15 \\ -11000 \\ 4.2239e\text{-}14 \\ -10999 \\ -3.3216e\text{-}14 \\ 37995 \\ -254522 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \Delta 1 \\ \Phi 1 \\ \Delta 2 \\ \Phi 2 \\ \Delta 3 \\ \Phi 3 \\ \Delta 4 \\ \Phi 4 \\ \Delta 5 \\ \Phi 5 \\ \Delta 6 \\ \Phi 6 \\ \Delta 7 \\ \Phi 7 \\ \Delta 8 \\ \Phi 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.00055 \\ -0.00022 \\ -0.00151 \\ -0.00021 \\ -0.0021 \\ -0.00007 \\ -0.0020 \\ 0.00010 \\ -0.00138 \\ 0.00021 \\ -0.00051 \\ 0.00020 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Keterangan:
Δ = Displacement (m)
Θ = Sudut simpangan (derajat)
P = Gaya Berat Pompa (N)
M=Momen gaya(Nm)

LAMPIRAN E

Pemodelan matematis dengan E=1,83.10^{11}

$I := 0.011$ $\qquad$ $E := 1.83 \cdot 10^{11}$

$L1 := 4$ $\qquad$ $L2 := 4$ $\qquad$ $L3 := 4$ $\qquad$ $L4 := 4$

$L5 := 4$ $\qquad$ $L6 := 4$ $\qquad$ $L7 := 4.25$

Matrix setiap elemen

$$(K) := \begin{pmatrix} \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} \\ -\frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{12 \cdot E \cdot I}{L^3} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} \\ \frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{2 \cdot E \cdot I}{L} & -\frac{6 \cdot E \cdot I}{L^2} & \frac{4 \cdot E \cdot I}{L} \end{pmatrix}$$

Sehingga didapatkan nilai seperti berikut

- Elemen 1 berbatas node 1 dan node 2

$$K1 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 2 & 2 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 3.774 \times 10^{8} & 7.549 \times 10^{8} & -3.774 \times 10^{8} & 7.549 \times 10^{8} \\ 7.549 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} & -7.549 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} \\ -3.774 \times 10^{8} & -7.549 \times 10^{8} & 3.774 \times 10^{8} & -7.549 \times 10^{8} \\ 7.549 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} & -7.549 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \end{array}$$

- Elemen 2 berbatas node 2 dan node 3

$$K2 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 2 & 2 & 3 & 3 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 3.774 \times 10^{8} & 7.549 \times 10^{8} & -3.774 \times 10^{8} & 7.549 \times 10^{8} \\ 7.549 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} & -7.549 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} \\ -3.774 \times 10^{8} & -7.549 \times 10^{8} & 3.774 \times 10^{8} & -7.549 \times 10^{8} \\ 7.549 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} & -7.549 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 2 \\ 2 \\ 3 \\ 3 \end{array}$$

- Elemen 3 berbatas node 3 dan node 4

$$K3 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 3 & 3 & 4 & 4 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 3.774 \times 10^{8} & 7.549 \times 10^{8} & -3.774 \times 10^{8} & 7.549 \times 10^{8} \\ 7.549 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} & -7.549 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} \\ -3.774 \times 10^{8} & -7.549 \times 10^{8} & 3.774 \times 10^{8} & -7.549 \times 10^{8} \\ 7.549 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} & -7.549 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 3 \\ 3 \\ 4 \\ 4 \end{array}$$

- Elemen 4 berbatas node 4 dan node 5

$$K4 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 4 & 4 & 5 & 5 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 3.774 \times 10^8 & 7.549 \times 10^8 & -3.774 \times 10^8 & 7.549 \times 10^8 \\ 7.549 \times 10^8 & 2.013 \times 10^9 & -7.549 \times 10^8 & 1.006 \times 10^9 \\ -3.774 \times 10^8 & -7.549 \times 10^8 & 3.774 \times 10^8 & -7.549 \times 10^8 \\ 7.549 \times 10^8 & 1.006 \times 10^9 & -7.549 \times 10^8 & 2.013 \times 10^9 \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 4 \\ 4 \\ 5 \\ 5 \end{array}$$

- Elemen 5 berbatas node 5 dan node 6

$$K5 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 5 & 5 & 6 & 6 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 3.774 \times 10^8 & 7.549 \times 10^8 & -3.774 \times 10^8 & 7.549 \times 10^8 \\ 7.549 \times 10^8 & 2.013 \times 10^9 & -7.549 \times 10^8 & 1.006 \times 10^9 \\ -3.774 \times 10^8 & -7.549 \times 10^8 & 3.774 \times 10^8 & -7.549 \times 10^8 \\ 7.549 \times 10^8 & 1.006 \times 10^9 & -7.549 \times 10^8 & 2.013 \times 10^9 \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 5 \\ 5 \\ 6 \\ 6 \end{array}$$

- Elemen 6 berbatas node 6 dan node 7

$$K6 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 6 & 6 & 7 & 7 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 3.774 \times 10^8 & 7.549 \times 10^8 & -3.774 \times 10^8 & 7.549 \times 10^8 \\ 7.549 \times 10^8 & 2.013 \times 10^9 & -7.549 \times 10^8 & 1.006 \times 10^9 \\ -3.774 \times 10^8 & -7.549 \times 10^8 & 3.774 \times 10^8 & -7.549 \times 10^8 \\ 7.549 \times 10^8 & 1.006 \times 10^9 & -7.549 \times 10^8 & 2.013 \times 10^9 \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 6 \\ 6 \\ 7 \\ 7 \end{array}$$

- Elemen 7 berbatas node 7 dan node 8

$$K7 = \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 7 & 7 & 8 & 8 \end{array} \\ \begin{pmatrix} 3.343 \times 10^{8} & 7.105 \times 10^{8} & -3.343 \times 10^{8} & 7.105 \times 10^{8} \\ 7.105 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} & -7.105 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} \\ -3.343 \times 10^{8} & -7.105 \times 10^{8} & 3.343 \times 10^{8} & -7.105 \times 10^{8} \\ 7.549 \times 10^{8} & 1.006 \times 10^{9} & -7.549 \times 10^{8} & 2.013 \times 10^{9} \end{pmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ 7 \\ 7 \\ 8 \\ 8 \end{array}$$

Matrik Kekakuan Global 7 Elemen

$$
\begin{pmatrix} P1 \\ M1 \\ P2 \\ M2 \\ P3 \\ M3 \\ P4 \\ M4 \\ P5 \\ M5 \\ P6 \\ M6 \\ P7 \\ M7 \\ P8 \\ M8 \end{pmatrix}
=
\left(\begin{array}{cccccc|cccccccc|cc}
3.774\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & -3.774\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
7.549\times10^{8} & 2.013\times10^{9} & -7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-3.774\times10^{8} & -7.549\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & -3.774\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 4.026\times10^{9} & -7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\hline
0 & 0 & -3.774\times10^{8} & -7.549\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & -3.774\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 4.026\times10^{9} & -7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -3.774\times10^{8} & -7.549\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & -3.774\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 4.026\times10^{9} & -7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.774\times10^{8} & -7.549\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & -3.774\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 4.026\times10^{9} & -7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.774\times10^{8} & -7.549\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & -3.774\times10^{8} & 7.549\times10^{8} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 4.026\times10^{9} & -7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.774\times10^{8} & -7.549\times10^{8} & 7.118\times10^{8} & -4.44\times10^{7} & -3.343\times10^{8} & 7.105\times10^{8} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & -4.44\times10^{7} & 4.026\times10^{9} & -7.105\times10^{8} & 1.006\times10^{9} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.343\times10^{8} & -7.105\times10^{8} & 3.343\times10^{8} & -7.105\times10^{8} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7.549\times10^{8} & 1.006\times10^{9} & -7.549\times10^{8} & 2.013\times10^{9}
\end{array}\right)
\begin{pmatrix} \Delta1 \\ \Phi1 \\ \Delta2 \\ \Phi2 \\ \Delta3 \\ \Phi3 \\ \Delta4 \\ \Phi4 \\ \Delta5 \\ \Phi5 \\ \Delta6 \\ \Phi6 \\ \Delta7 \\ \Phi7 \\ \Delta8 \\ \Phi8 \end{pmatrix}
$$

Hasil *displacement* pada masing-masing *node* sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} P1 \\ M1 \\ P2 \\ M2 \\ P3 \\ M3 \\ P4 \\ M4 \\ P5 \\ M5 \\ P6 \\ M6 \\ P7 \\ M7 \\ P8 \\ M8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 51428 \\ 262672 \\ -18999 \\ -1.1999e\text{-}16 \\ -18999 \\ 2.3857e\text{-}14 \\ -19000 \\ 2.0806e\text{-}14 \\ -10999 \\ 2.43260e\text{-}14 \\ -11000 \\ -6.5440e\text{-}15 \\ -10999 \\ -3.536e\text{-}14 \\ 37447 \\ -2514 \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} \Delta 1 \\ \Phi 1 \\ \Delta 2 \\ \Phi 2 \\ \Delta 3 \\ \Phi 3 \\ \Delta 4 \\ \Phi 4 \\ \Delta 5 \\ \Phi 5 \\ \Delta 6 \\ \Phi 6 \\ \Delta 7 \\ \Phi 7 \\ \Delta 8 \\ \Phi 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -0.0007 \\ -0.00031 \\ -0.0020 \\ -0.00029 \\ -0.00292 \\ -0.00009 \\ -0.00282 \\ 0.00013 \\ -0.00191 \\ 0.00029 \\ -0.00070 \\ 0.000278 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Keterangan:
Δ = Displacement (m)
Θ = Sudut simpangan (derajat)
P = Gaya Berat Pompa (N)
M=Momen gaya(Nm)

LAMPIRAN F

- INSTRUCTION AND OPERATING MANUAL PUMP

Take care not to get burned by hot components!

Do not spot heating the hub or distortion may occur.

2.4 **Checking of hub**

In order to insure the proper installation of the hub, verify the misalignments of the flange's circumference and end surface by dial indicators, the magnitudes mustn't exceed 0.5 mm. In case they get beyond, it indicates that the hub wasn't properly installed, find out the reason and reinstall the hub.

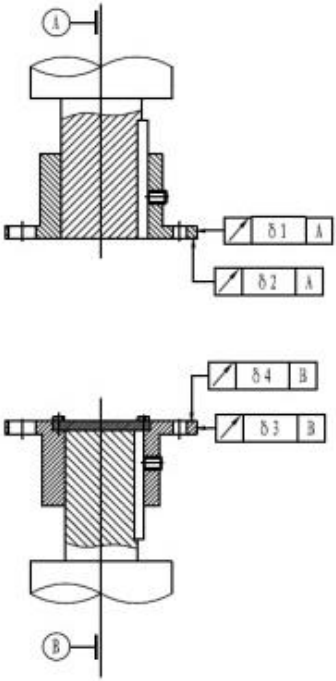


Fig.1

3.0 **Assembly of Spacer and Disc Packs**

3.1 Mount the support plate to the spacer, and tie the disc pack on the spacer with rope, see Fig.2. During supporting or suspending the spacer, take care of personnel safety.

BIODATA PENULIS

Nama penulis Septyan Arief Isnandar dilahirkan di Nganjuk, tanggal 8 September 1995 dari bapak yang bernama Rumaji dan ibu bernama Yatini. Saat ini penulis tinggal di Desa Ngadipiro, Kec Wilangan, Kab Nganjuk Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Ngadipiro 3 pada tahun 2008, pendidikan di SMPN 3 Nganjuk pada tahun 2011, pendidikan di SMAN 2 Nganjuk pada tahun 2014 kemudian melanjutkan studi S1 di Teknik Fisika FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Cukup banyak aktivitas organisasi dan pengalaman yang dijalani penulis selama menjadi mahasiswa. Pada tahun pertama penulis aktif bergabung di UKM entrepreneur ITS yang berlanjut sampai tahun kedua, pada tahun kedua penulis juga bergabung dengan laboratorium bidang minat di Teknik Fisika yaitu laboratorium Vibrasi dan Akustik sampai pada tahun terakhir, penulis beberapa kali terlibat dengan penelitian dan projek industri di Laboratorium ini, juga pernah di berikan amanah menjadi koordinator laboratorium. Untuk pertanyaan, kritik, dan saran, penulis dapat dihubungi melalui email arief.isnandar08@gmail.com atau dapat juga melalui akun facebook Septyan Arief.