TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS KEGAGALAN POROS *GEARBOX* PADA MESIN *ROTARY DRUM GRANULATOR*

NANINDYA VIDIANTI ALVIONITA
NRP. 02111540000001

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS KEGAGALAN POROS *GEARBOX* PADA MESIN *ROTARY DRUM GRANULATOR*

NANINDYA VIDIANTI ALVIONITA
NRP. 02111540000001

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
2020

FINAL PROJECT - TM184835

FAILURE ANALYSIS OF GEARBOX SHAFT IN ROTARY DRUM GRANULATOR

NANINDYA VIDIANTI ALVIONITA
NRP. 02111540000001

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMEN
FACULTY OF INDUSTRIAL AND SYSTEM ENGINEERING
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2020

HALAMAN PENGESAHAN
ANALISIS KEGAGALAN POROS *GEARBOX* PADA MESIN *ROTARY DRUM GRANULATOR*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
NANINDYA VIDIANTI ALVIONITA
NRP. 02111540000001

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA ..... (Pembimbing)
   NIP 196308151989032001
2. Dr. Eng. Sutikno, ST, MT ..... (Penguji I)
   NIP 197407032000031001
3. Ika Dewi Wijayanti, ST, MSc ..... (Penguji II)
   NIP 198512022014042002
4. Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc., Ph.D ..... (Penguji III)
   NIP 197801152003121002

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISIS KEGAGALAN POROS *GEARBOX* PADA MESIN *ROTARY DRUM GRANULATOR*

Nama Mahasiswa : Nanindya Vidianti Alvionita
NRP : 02111540000001
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA

ABSTRAK

Elemen-elemen mesin yang digunakan dalam serangkaian proses produksi, bekerja saling berkaitan satu sama lain. Kerusakan pada salah satu elemen mesin, dengan berjalannya waktu, akan mempengaruhi elemen mesin yang lain sehingga menghambat kerja mesin. Hal ini terjadi pada rotary drum granulator dimana salah satu poros gearbox mengalami patah secara tiba-tiba. Patahan tersebut terjadi justru, setelah poros menggunakan bearing baru untuk menggantikan bearing lama yang mengalami keausan. Patahnya poros gearbox menyebabkan mesin berhenti beroperasi yang selanjutnya menghambat proses produksi. Oleh sebab itu perlu dilakukan analisis kegagalan poros yang patah agar tidak terjadi kegagalan yang sama dikemudian hari.

Analisis kegagalan dimulai dengan observasi lapangan untuk mengetahui bentuk dan permukaan patahan poros. Pengambilan data pendukung dilakukan untuk membantu dalam menganalisis kegagalan. Poros yang patah menjadi 2 bagian dimana setiap bagian memiliki permukaan patahan digunakan untuk mengetahui jenis patahannya. Bentuk dan dimensi poros digunakan untuk melihat adanya antisipasi terhadap konsentrasi tegangan pada daerah perubahan diameter. Perilaku bearing diamati untuk mengetahui korelasinya dengan kerusakan poros. Informasi hasil pengukuran getaran dan suhu bearing digunakan untuk mengetahui pengaruh bearing terhadap patahnya poros. Kebiasaan dalam proses operasi seperti terjadinya trip serta

langkah-langkah selanjutnya untuk menjalankan kembali kerja drum digunakan untuk melengkapi data analisa.

Hasil analisis permukaan patahan menunjukkan bahwa poros mengalami torsional fatigue. Kelelahan tersebut terjadi akibat beban berlebih pada saat terjadi trip yang berulang-ulang. Beban berlebih menyebabkan poros berputar pada sumbu yang berubah-ubah yang diperkuat dengan adanya keausan ujung-ujung gigi dan roller pada bearing. Poros berputar pada sumbu yang berubah-ubah pada saat berpasangan dengan bearing yang aus. Pemakaian bearing aus secara terus-menerus akan memperparah keausannya yang ditunjukkan dengan hasil pengukuran getaran yang sangat besar. Hal ini akan mengakibatkan kerusakan yang tidak tampak secara fisik yaitu adanya kelelahan serta penurunan kemampuan poros dan bearing dalam meneruskan daya. Sementara itu, penggantian bearing yang baru mengharuskan poros untuk meneruskan daya secara penuh sehingga poros yang sudah lelah mengalami patah. Lokasi patahan terjadi pada daerah yang mengalami perubahan diameter dimana terdapat fillet.

Kata Kunci: Poros, Bearing, Torsional Fatigue, Trip

FAILURE ANALYSIS OF GEARBOX SHAFT IN ROTARY DRUM GRANULATOR

Name : **Nanindya Vidianti Alvionita**
NRP : **02111540000001**
Department : **Teknik Mesin**
Supervisor : **Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA**

ABSTRACT

Machine elements that used in production process, related to each other. When there is failure of one of machine elements, as time goes by, it will affect other machine elements and production process will be obstructed. There is a failure in rotary drum granulator where the shaft fracture occurs suddenly. The fracture occurred precisely, after the shaft used new bearing to replace bearing which had worn out. A broken gearbox causes the machine to stop operating and it will hinder the production process. Therefore, it is necessary to analyze the failure of the broken shaft so that the same failure does not occur in the future.

The failure analysis begins with observations to find out the shape and surface fracture of the shaft. Collect the supporting data to assist in analyzing failures. The broken shaft into 2 parts where each part has a fracture surface is used to determine the type of fracture. The shape and dimensions of the shaft are used to see the anticipated stress concentration in the area of change in diameter. Bearing behavior is observed to determine its correlation with shaft failure. Information on the measurement results of bearing's vibration and temperature is used to determine the influence of bearings on shaft fractures. The operating process such as the occurrence of trips and steps to restart the drum are used to complete the analysis data.

The results of surface fracture analysis, there is torsional fatigue on the shaft. This fatigue occurs due to excessive loads when there are repeated trips. Excessive load causes the

shaft rotating on a variable axis as evidencedby wear of the gear ends and rollers in the bearings. The shaft rotates on a variable axis when paired with a worn bearing. The use of worn bearings will increase the wear which is indicated by the measurement results of very high vibration. High vibration will cause a failure that is not physically visible, namely fatigue and it will decrease the ability of shafts and bearings to transmit power. Meanwhile, the replacement of a new bearing requires the shaft to transmit full power so that the fracture of fatigue shaft happen. Fracture occurs in area that have changed in diameter where fillets are present.

Keywords: Shaft, Bearing, Torsional Fatigue, Trip

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik. Shalawat serta salam juga tak lupa penulis haturkan kepada Rasulullah SAW, beserta para keluarga dan sahabat beliau.

Terselesaikannya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Orang tua, adik, dan keluarga besar penulis.
2. Ibu Dr. Ir. H. C. Kis Agustin, DEA selaku dosen pembimbing tugas akhir.
3. Bapak Dr. Eng. Sutikno, ST. MT., Fahmi Mubarok, S.T., M.Sc., Ph.D, dan ibu Ika Dewi Wijayanti, ST, MSc selaku dosen penguji.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc. Eng, Ph.D selaku dosen wali.
5. Bapak Luthfil yang sudah banyak membantu penulis.
6. Seluruh karyawan di S1 Departemen Teknik Mesin ITS.
7. Teman-teman angkatan M58, Mesin ITS Autosport, dan warga laboratorium metalurgi.
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak. Penulis berharap tugas akhir ini akan bermanfaat bagi pembaca dan dapat menjadi masukan bagi perusahaan dimana penulis melakukan penelitian. Sekian dan terima kasih.

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....i
ABSTRAK.....iii
ABSTRACT.....v
KATA PENGANTAR.....vii
DAFTAR ISI.....ix
DAFTAR GAMBAR.....xiii
DAFTAR TABEL.....xix
BAB I PENDAHULUAN.....1
1.1 Latar Belakang.....1
1.2 Rumusan Masalah.....4
1.3 Tujuan Penelitian.....5
1.4 Batasan Penelitian.....5
1.5 Manfaat Penelitian.....5
BAB II DASAR TEORI.....7
2.1 *Rotary Drum Granulator*.....7
2.2 *Failure Analysis*.....8
2.3 Poros.....9
2.4 Roda Gigi.....10
2.5 *Bearing*.....12
2.6 Baja.....14
2.7 Perlakuan Panas.....14

2.8 Getaran.....16
2.9 *Misalignment*.....16
2.10 Patahan.....17
2.11 Kelelahan (*Fatigue*).....18
2.12 Tinjauan Pustaka.....23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....27
3.1 Diagram Alir Penelitian.....27
3.2 Peralatan.....27
3.3 Sampel Material.....28
3.4 Langkah-Langkah Penelitian.....28
3.4.1 Observasi Lapangan.....28
3.4.2 Studi Literatur.....29
3.4.3 Pengambilan Data.....29
3.4.4 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian.....30
3.4.5 Pengamatan Makroskopis.....30
3.4.6 Pengolahan Data dan Analisis.....32
BAB IV DATA DAN ANALISIS.....33
4.1 *Fishbone Diagram Analysis*.....33
4.2 Poros.....33
4.2.1 Komposisi Kimia, Kekerasan, dan Perlakuan Panas..33
4.2.2 Bentuk *Fillet* Poros.....35
4.2.3 Permukaan Patahan Poros.....37
4.3 Roda Gigi.....42

4.4 Pengukuran Getaran dan Suhu *Bearing* 46
4.5 *Trip* 50
4.6 Ringkasan Analisis 52
BAB V.....55
KESIMPULAN DAN SARAN 55
5.1 Kesimpulan.....55
5.2 Saran 55
DAFTAR PUSTAKA 57
LAMPIRAN.....59
BIODATA PENULIS 63

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 a) Lokasi patahan; b) Permukaan patahan poros pompa submersible (Sunandrio & Sutarjo, 2014:3)..... 2
Gambar 1. 2 a) Lokasi patahan (Xiaolei & Zhiwei, 2008:2); b) Permukaan patahan poros (Xiaolei & Zhiwei, 2008:3)..... 3
Gambar 1. 3 Mesin *rotary drum granulator* (Gambar dari perusahaan)..... 3
Gambar 1. 4 Poros patah pada bagian yang mengalami perubahan diameter..... 4
Gambar 1. 5 Permukaan patahan poros..... 4

Gambar 2. 1 Komponen-komponen yang mendukung proses kerja *rotary drum granulator* (Gambar dari perusahaan)..... 7
Gambar 2. 2 Contoh *fishbone diagram analysis* (ASM Vol 11, 2002:46)..... 9
Gambar 2. 3 a) *Large radius undercut into the shoulder*, b) *Large radius relief groove into the back of the shoulder*, c) *Large radius relief groove into the small diameter* (Budynas & Nisbett, 2015:364)..... 10
Gambar 2. 4 *Spur gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:520)..... 10
Gambar 2. 5 *Helical gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:602)..... 11
Gambar 2. 6 Arah gaya aksial (*thrust*) pada *helical gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:607)..... 11
Gambar 2. 7 *Bevel gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:638)..... 12
Gambar 2. 8 *Worm gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:624)..... 12
Gambar 2. 9 *Spherical roller bearing* dan bagian-bagiannya (SKF *Rolling Bearing Catalogue*, 2016:880)..... 13

Gambar 2. 10 *Roller* dan *inner ring* dapat dimiringkan untuk mengatasi *misalignment* (SKF *Rolling Bearing Catalogue*, 2016:880)..... 13
Gambar 2. 11 Temperatur pemanasan baja *hypoeutectoid* (0% - 0.8% C) yaitu sekitar 50oF diatas garis temperatur kritis atas (A_3), sedangkan pada baja *hypereutectoid* (0.8% - 2% C) yaitu sekitar 50oF diatas garis temperatur kritis bawah ($A_{3,1}$) (Avner, 1974:253)..... 15
Gambar 2. 12 *Parallel misalignment* (Etsworld, 2018)..... 16
Gambar 2. 13 *Angular misalignment* (Etsworld, 2018)..... 17
Gambar 2. 14 *Combination misalignment* (Etsworld, 2018)..... 17
Gambar 2. 15 *Softfoot* (Etsworld, 2018) 17
Gambar 2. 16 (a) Patah ulet; (b) Patah getas (Callister, 2007:209) 18
Gambar 2. 17 Skema permukaan patahan yang menunjukkan tahap awal retak (*initiation crack*), tahap perambatan retak (*crack propagation*), dan tahap patah akhir (*final fracture*) (Meyers & Chawla, 2009:731 & 714). 19
Gambar 2. 18 *Extrution* dan *intrution* pada permukaan komponen sebagai awal retak (Meyers & Chawla, 2009:728)..... 19
Gambar 2. 19 *Beachmarks* terlihat jelas ditunjukkan dengan tanda panah sehingga dapat diketahui lokasi awal retak dan patahan akhir (Avner, 1974:645)..... 20
Gambar 2. 20 *Striation* yang dilihat menggunakan mikroskop (Meyers & Chawla, 2009:732)..... 21
Gambar 2. 21 *Ratchet marks* yang terbentuk akibat pertemuan antar *beachmarks* ditunjukkan oleh tanda panah (Jokosisworo & Jatmiko, 2012:47)..... 21
Gambar 2. 22 Bentuk permukaan patah akhir akibat kelelahan berada pada daerah yang paling luas ditunjukkan dengan tanda panah (Callister & Rethwisch, 2009:210). 22
Gambar 2. 23 Permukaan patahan berpenampang lingkaran akibat kelelahan dengan tegangan yang berbeda-beda (ASM Vol. 12, 1987:216)..... 23

Gambar 2. 24 a) Lokasi terjadinya patahan; b) Permukaan patahan poros (Sunandrio & Sutarjo, 2014: 3). 24
Gambar 2. 25 Bentuk permukaan patahan. Terdapat alur-alur deformasi akibat puntiran patahan (Sunandrio & Sutarjo, 2014:5). 24
Gambar 2. 26 Lokasi patahan poros pada daerah yang memiliki perbedaan diameter yaitu antara I dan H (Xiaolei & Zhiwei, 2008:2)..... 25
Gambar 2. 27 Permukaan patahan poros yang menunjukkan adanya beberapa awal retak yang ditandai dengan adanya *ratchet marks* (Xiaolei & Zhiwei, 2008:3)..... 26

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian 27
Gambar 3. 2 Poros *gearbox* mesin *rotary drum granulator* yang patah. 28
Gambar 3. 3 Permukaan patahan poros..... 28
Gambar 3. 4 (a) Jangka sorong digunakan untuk mengetahui dimensi komponen; (b) Kamera selular; (c) Kamera digital; (d) Lup digunakan untuk mengamati bentuk permukaan patahan.... 31

Gambar 4. 1 *Fishbone diagram analysis* patahnya poros *gearbox*. 33
Gambar 4. 2 Tampak atas susunan poros dalam *gearbox*. Poros 1 yang patah merupakan poros yang berhubungan dengan motor melalui *fluid coupling*..... 35
Gambar 4. 3 a) Gambar sketsa poros 1; b) Bagian poros dimana terdapat 2 *fillet*; c) Perbesaran *fillet* gambar b yang menunjukkan *large radius relief groove into the small diameter*; d) Perbesaran *fillet* gambar b yang menunjukkan *large radius undercut into the shoulder*. 36
Gambar 4. 4 a) Gambar sketsa *large radius relief groove into the small diameter;* b) Gambar sketsa *large radius undercut into the shoulder* (Budynas & Nisbet, 2015:364)..... 36

Gambar 4.5 a) Gambar sketsa poros dimana terdapat *fillet* dan letak patahan. Poros bagian kanan berhubungan dengan motor; b) Bagian poros yang mengalami perubahan diameter dimana terdapat 2 *fillet*. Letak patahan berada di perbatasan 2 *fillet*..... 37
Gambar 4. 6 Dua permukaan patahan menunjukkan alur yang berlawanan. Permukaan patahan R searah putaran jam atau *clockwise* (CW), sedangkan permukaan patahan L berlawanan arah jarum jam atau *counterclockwise* (CCW). Hal ini menunjukkan dua permukaan patahan terdapat dalam satu bidang yaitu lokasi patahan. 38
Gambar 4. 7 Permukaan patahan L dan R yang bersesuaian dimana terdapat perbedaan tekstur permukaan, jumlah *ratchet marks*, dan daerah patah akhir..... 39
Gambar 4. 8 Salah satu contoh *ratchet marks* dimana tidak terletak pada satu bidang yang ditunjukkan dengan adanya beda ketinggian. 40
Gambar 4. 9 Daerah patah akhir dimana terdapat ketinggian permukaan yang berbeda (panah A) dan alur putaran dengan sumbu berbeda-beda menunjukkan adanya deformasi plastis dan gesekan..... 41
Gambar 4. 10 a) Poros yang merupakan satu kesatuan dengan roda gigi; b) Roda gigi apabila dilihat dari sisi kanan. 42
Gambar 4. 11 a) Gigi 15, 16, dan 17 yang diamati. Lokasi keausan disebelah kiri lebih banyak yaitu pada gigi 15, 16, dan 17 (gambar b), sedangkan di sebelah kanan hanya pada gigi 17 (gambar c)..... 43
Gambar 4. 12 a) Gigi 21, 22, dan 23 yang diamati. Lokasi keausan di sebelah kanan lebih banyak yaitu pada gigi 21, 22, dan 23 (gambar c), sedangkan di sebelah kiri hanya pada gigi 21 dan 22 (gambar b)..... 44
Gambar 4. 13 a) Gigi 4, 5, dan 6 yang diamati. Tidak ada keausan di sebelah kiri gigi (gambar b), sedangkan di sebelah kanan, gigi 5 dan 6 mengalami keausan (gambar c). 45
Gambar 4. 14 Batas Getaran *Bearing*. 46

Gambar 4. 15 Tampak atas susunan poros-poros dan *bearing* dalam *gearbox* dimana angka 1 sampai 8 menunjukkan nomor *bearing*. *Bearing* nomor 1 dan 2 menumpu poros yang berfungsi sebagai penggerak..... 47
Gambar 4. 16 Perbandingan *bearing* benar dengan *bearing* yang rusak dari mesin lain. Kerusakan *bearing* tersebut sama dengan keausan yang ada pada *bearing* yang dianalisis. a) Tampak depan; b) Tampak atas. 50
Gambar 4. 17 Grafik pemakaian arus motor yang menunjukkan beban muatan *drum* dengan sumbu vertikal adalah arus listik (A) dan sumbu horizontal adalah waktu (jam). Grafik ini menunjukkan hasil *record* 14 jam terakhir sebelum poros patah. Poros patah tidak pada beban maksimal (30 A) yang ditunjukkan dengan tanda panah..... 51

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Tabel Pengambilan Data..... 29
Tabel 3. 2 Tabel Pengamatan Makroskopis..... 31

Tabel 4. 1 Komposisi Kimia dan Kekerasan..... 34
Tabel 4. 2 Pencatatan dan Rekaman Terakhir pada Poros dan *Bearing*..... 48
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Getaran *Bearing* pada 7 Maret 2019 49
Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran Suhu *Bearing*..... 49

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

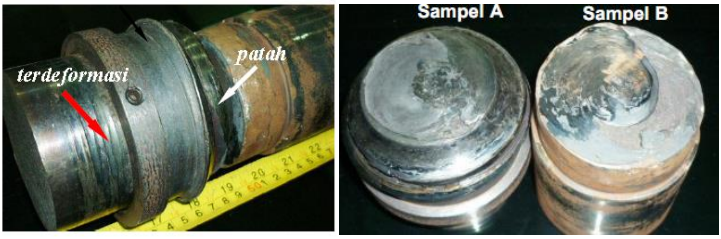
BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Poros merupakan elemen mesin berpenampang lingkaran yang bergerak secara berputar dan berfungsi untuk meneruskan daya dari satu tempat ke tempat yang lain. Poros digunakan dalam berbagai macam mesin salah satunya yaitu mesin produksi, baik kontinu maupun tidak. Apabila digunakan pada mesin produksi kontinu, poros harus mampu beroperasi secara terus-menerus. Terdapat 4 faktor yang mempengaruhi umur kerja poros yaitu desain, proses pembuatan, cara pasang-lepas, dan penggunaan poros (Bakic dkk, 2007:198). Setiap faktor utama memiliki beberapa faktor yang lebih spesifik seperti pemilihan material, kondisi lingkungan, *shaft balancing*, beban kerja, suhu, getaran, dan lain-lain (Bakic dkk, 2007:198). Penyebab kerusakan poros juga dapat diakibatkan oleh rusaknya elemen mesin lain yang berkaitan dengan kerja poros sehingga tidak beroperasi seperti seharusnya. Kesalahan pada salah satu faktor tersebut dapat mengakibatkan kerusakan awal tanpa mengalami patah seperti defleksi, keausan, dan korosi (S. P. Raut & L. P. Raut, 2014:161). Apabila kerusakan awal tersebut tidak diatasi, maka akan mengakibatkan poros patah sebelum waktu yang direncanakan. Poros yang patah secara tiba-tiba akan menghambat proses produksi dan menyebabkan kerugian, terutama pada proses produksi yang beroperasi secara terus-menerus.

Berbagai analisis permukaan patahan telah dilakukan untuk mengetahui penyebab terjadinya kerusakan dan menentukan pencegahan agar tidak terjadi kerusakan yang sejenis. Pada tahun 2014 Hadi Sunandrio dan Sutarjo menganalisis patahan poros pompa submersible dengan judul Analisis Kegagalan Shaft Pompa Submersible pada Unit Pengeboran Minyak Bumi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa patahan terjadi akibat gesekan antara permukaan poros dan *bearing*. Gesekan tersebut menimbulkan panas sehingga poros dan *bearing* saling menempel yang ditandai

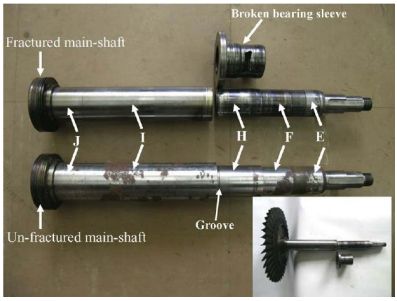
dengan adanya deformasi pada permukaan poros. Hal tersebut mengakibatkan poros terhenti secara tiba-tiba dan menimbulkan adanya beban kejut. Motor yang masih berputar menyebabkan timbulnya gaya puntir pada poros hingga patah. Patahan terletak pada daerah yang memiliki perbedaan diameter dimana merupakan daerah yang memiliki konsentrasi tegangan tinggi. Gambar 1.1 menunjukkan lokasi dan permukaan patahan poros pompa submersible. Selain itu, terdapat analisis kegagalan berjudul



a) b)

Gambar 1. 1 a) Lokasi patahan; b) Permukaan patahan poros pompa submersible (Sunandrio & Sutarjo, 2014:3).

Failure Analysis of a Locomotive Turbocharger Main Shaft oleh Xu Xiaolei dan Yu Zhiwei pada tahun 2008 menunjukkan bahwa patahan terjadi berawal dari adanya *turbocharger* yang beroperasi tidak semestinya. Hal tersebut menyebabkan adanya gaya gesek yang tinggi antara *bearing sleeve* dengan poros. Gesekan tersebut menyebabkan naiknya suhu sehingga menurunkan *fatigue strength* pada *fillet* antara bagian I dan H seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.2. Pada daerah tersebut poros mengalami patah.

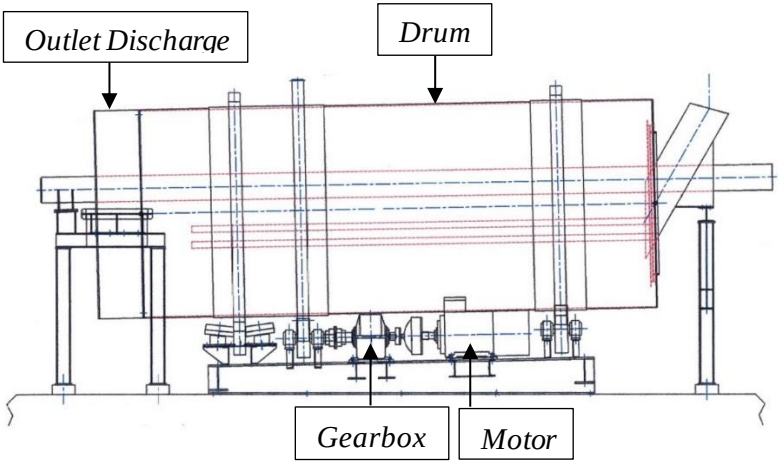


a)

b)

Gambar 1. 2 a) Lokasi patahan (Xiaolei & Zhiwei, 2008:2); b) Permukaan patahan poros (Xiaolei & Zhiwei, 2008:3).

Salah satu poros *gearbox* pada pabrik Pupuk Phonska juga mengalami patah sehingga proses produksi terhenti secara tiba-tiba. Poros tersebut termasuk komponen penunjang beroperasinya mesin *rotary drum granulator* yang ditunjukkan pada gambar 1.3.



Gambar 1. 3 Mesin *rotary drum granulator* (Gambar dari perusahaan).

Poros patah tepat pada daerah yang mengalami perubahan diameter. Poros yang patah ditunjukkan pada gambar 1.4. Kegagalan tersebut menghasilkan sepasang permukaan patahan poros yang ditunjukkan pada gambar 1.5.

Gambar 1. 4 Poros patah pada bagian yang mengalami perubahan diameter.

Gambar 1. 5 Permukaan patahan poros.

Patahnya poros menyebabkan *rotary drum granulator* berhenti beroperasi sehingga menghambat proses produksi dan perusahaan mengalami kerugian. Oleh sebab itu, perlu dilakukan analisis kegagalan terhadap patahnya poros untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dikemudian hari.

1.2 Rumusan Masalah

Apa penyebab dan bagaimana mekanisme terjadinya patah pada poros?

1.3 Tujuan Penelitian

Mengetahui penyebab dan mekanisme terjadinya patah pada poros.

1.4 Batasan Penelitian

1. Bukti kegagalan yang digunakan dalam analisis hanya poros patah menjadi 2 bagian.
2. Bukti *record* kerja drum, poros, *bearing*, dan motor hanya pada saat terakhir sebelum poros patah.

1.5 Manfaat Penelitian

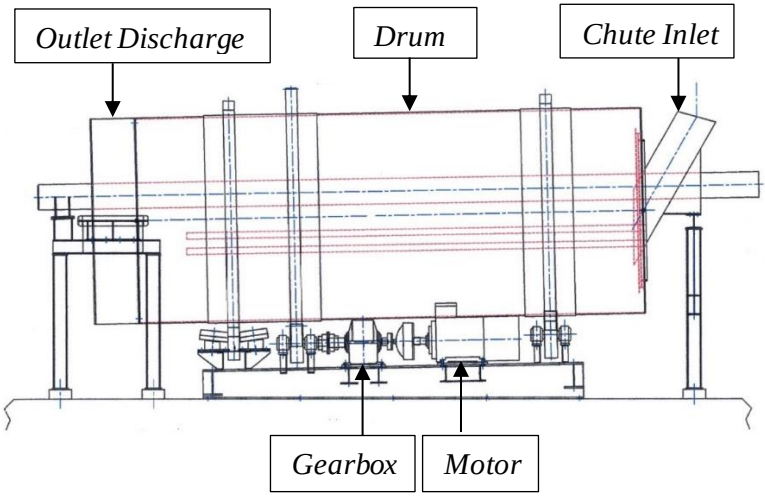
1. Bagi dunia industri agrokimia, diharapkan dapat mencegah terjadinya kerusakan yang sama di kemudian hari.
2. Bagi mahasiswa, diharapkan dapat memahami ilmu dan mengaplikasikan untuk menyelesaikan permasalahan kegagalan pada komponen-komponen mesin.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II
DASAR TEORI

2.1 *Rotary Drum Granulator*

Rotary drum granulator berperan pada tahap granulasi untuk menghasilkan produk berbentuk granul. Mesin ini dipasang secara horizontal dengan kemiringan tertentu untuk membantu pemindahan produk hasil granulasi. Komponen-komponen mesin yang mendukung proses kerja *rotary drum granulator* ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Komponen-komponen yang mendukung proses kerja *rotary drum granulator* (Gambar dari perusahaan).

Proses kerja *rotary drum granulator* dimulai ketika motor menghasilkan daya yang ditransmisikan menggunakan *fluid coupling* menuju *gearbox*. Daya tersebut diteruskan menggunakan *low speed coupling* menuju *pinion gear*. Daya yang diterima oleh *pinion gear* digunakan untuk memutar *riding gear* yang terpasang pada *drum*. *Drum* berputar bersamaan dengan *riding ring inlet* dan *riding ring outlet*. *Riding ring inlet* memutar *trunion inlet* yang

berfungsi sebagai penumpu *drum* pada bagian inlet, sedangkan *riding ring outlet* memutar *trunion outlet* sebagai penumpu *drum* pada bagian outlet.

2.2 *Failure Analysis*

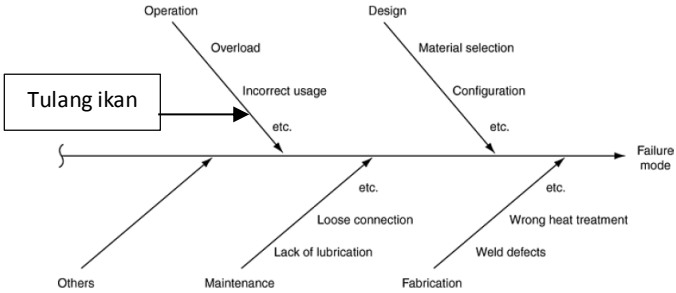
Failure analysis merupakan proses yang dilakukan untuk mengetahui akar permasalahan suatu kegagalan (ASM Vol 11, 2002:14). Kegagalan terjadi apabila komponen mesin beroperasi tidak semestinya, beroperasi namun mengancam keselamatan manusia, atau tidak beroperasi sama sekali. Berikut garis besar prosedur analisa kegagalan: (Avner, 1974:634)

1. Observasi awal yaitu melakukan pengamatan secara visual dan pengambilan gambar terhadap kerusakan komponen mesin.
2. *Background data* yaitu pengumpulan data yang meliputi gambar susunan, riwayat penggunaan, spesifikasi, cara pengoperasian, dan perawatan yang dilakukan pada komponen mesin.
3. Studi laboratorium seperti melakukan pengukuran terhadap komponen mesin, pengujian komposisi kimia, pengujian kekerasan, dan melakukan pengamatan terhadap permukaan patahan menggunakan mikroskop.
4. Analisa kegagalan yaitu melakukan studi literatur dan menghubungkannya dengan tanda-tanda kerusakan yang ada untuk mengetahui penyebab dan mekanisme kerusakan komponen mesin.

Salah satu metode analisa kegagalan yang dapat digunakan yaitu metode analisa sebab-akibat yang disebut dengan *fishbone diagram analysis*. Metode ini dilakukan dengan menyebutkan semua hal yang mungkin menjadi penyebab terjadinya kegagalan untuk mendapatkan akar permasalahannya. Gambar 2.2 merupakan contoh *fishbone diagram analysis*. Adapun langkah-langkah yang dilakukan untuk membuat *fishbone diagram analysis* adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan (*failure mode*) yang terjadi ditulis sebagai kepala ikan.

2. Faktor utama penyebab kegagalan ditulis sebagai tulang ikan
3. Semua sub faktor yang mungkin menjadi penyebab kegagalan ditulis pada masing-masing tulang ikan
4. Semua data dianalisa sehingga mendapatkan akar permasalahan penyebab kegagalan.



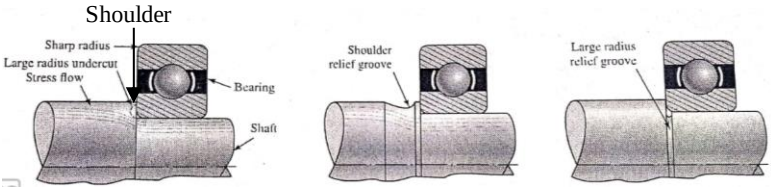
Gambar 2. 2 Contoh *fishbone diagram analysis* (ASM Vol 11, 2002:46).

2.3 Poros

Poros merupakan elemen mesin berpenampang lingkaran yang bergerak secara berputar dan berfungsi untuk meneruskan daya dari satu tempat ke tempat yang lain. Poros digunakan pada berbagai macam mesin dan berkaitan dengan elemen mesin lain seperti roda gigi, *bearing*, kopling, dan lain-lain. Keterkaitan poros dengan elemen mesin lain inilah yang menyebabkan desain poros harus diperhatikan seperti pemilihan material, geometri poros, besar tegangan yang mampu diterima poros, kemungkinan untuk berdefleksi, dan putaran kritis poros (Budynas & Nisbett, 2015:352).

Poros dapat dibuat melalui proses *hot rolled* atau *cold rolled*. Pemilihan material untuk poros lebih baik menggunakan baja karbon rendah atau baja karbon menengah agar kekuatan hasil perlakuan panasnya tidak terlalu tinggi. Semakin tinggi kekuatan material, apabila terdapat notch maka kecenderungan material untuk gagal juga semakin tinggi.

Bentuk poros yang digunakan dalam mesin berbeda-beda salah satunya yaitu poros yang mengalami perubahan diameter di sepanjang sumbunya. Pada daerah yang mengalami perubahan diameter akan timbul konsentrasi tegangan. Oleh sebab itu perlu dibuat *fillet* untuk mengantisipasi timbulnya konsentrasi tegangan. Terdapat 3 macam *fillet* yang ditunjukkan pada gambar 2.3.

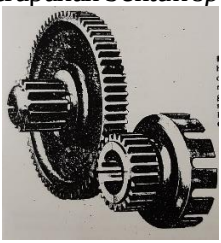


a) b) c)

Gambar 2. 3 a) *Large radius undercut into the shoulder*, b) *Large radius relief groove into the back of the shoulder*, c) *Large radius relief groove into the small diameter* (Budynas & Nisbett, 2015:364).

2.4 Roda Gigi

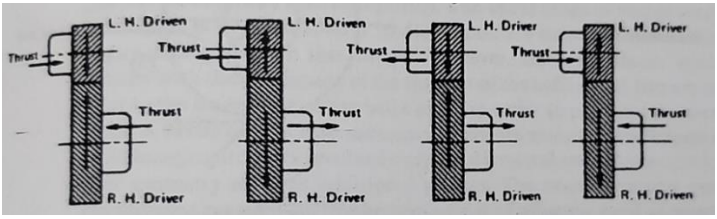
Roda gigi merupakan roda bergerigi yang berfungsi untuk menyalurkan daya dari satu poros ke poros yang lain. Terdapat bermacam-macam jenis roda gigi yaitu *spur gear*, h*elical gear*, *bevel gear*, dan *worm gear*. Masing-masing jenis roda gigi tersebut memiliki fungsi yang berbeda-beda. *Spur gear* digunakan pada kecepatan rendah dan hanya dapat digunakan pada posisi paralel. Gambar 2.4 merupakan bentuk *spur gear*.



Gambar 2. 4 *Spur gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:520)

Helical gear memiliki gigi miring yang berfungsi untuk putaran tinggi dan memiliki kelebihan yaitu tidak menimbulkan suara bising. *Helical gear* memiliki gaya aksial yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Roda gigi jenis ini dapat digunakan untuk menyalurkan daya antar 2 poros yang paralel. *Helical gear* ditunjukkan pada gambar 2.5

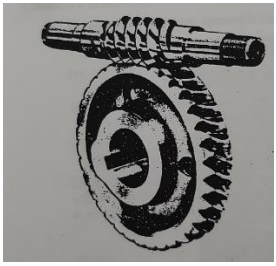
Gambar 2. 5 *Helical gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:602)



Gambar 2. 6 Arah gaya aksial (*thrust*) pada *helical gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:607).

Bevel gear merupakan roda gigi yang berfungsi untuk menyalurkan daya antar 2 poros dalam kondisi berpotongan. *Bevel gear* ditunjukkan pada gambar 2.7. Bentuk roda gigi yang lain yaitu worm gear. Roda gigi tersebut berfungsi untuk menyalurkan daya yang sangat besar. Worm gear terdiri dari bagian worm dan gear. Worm dan gear terpasang pada posisi tegak lurus.

Gambar 2. 7 *Bevel gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:638)



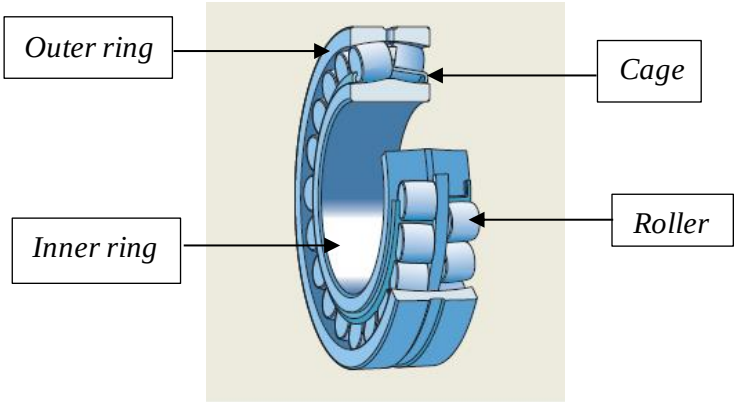
Gambar 2. 8 *Worm gear* (Deutschman, Michells, & Wilson, 1975:624)

2.5 *Bearing*

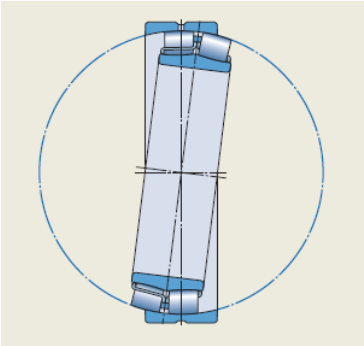
Bearing merupakan elemen mesin yang berfungsi untuk mempertahakan posisi poros agar berputar pada sumbu dan dudukannya. Selain itu, *bearing* berfungsi untuk mengurangi gesekan antara poros dengan dudukannya. Terdapat berbagai macam jenis *bearing*. Berdasarkan bentuk *roller*nya, *bearing* dibagi menjadi *ball bearing* dan *roller bearing*. *Ball bearing* terdiri dari *radial*, *angular contact*, dan *thrust bearing*, *sedangkan roller bearing* dibagi menjadi *cyllndrical*, *needle*, *tapered*, dan *spherical roller bearing*.

Spherical roller bearing dibagi menjadi 2 macam berdasarkan jumlah baris *roller*nya. Terdapat *bearing* 1 baris dan 2 baris. Gambar 2.9 merupakan *spherical roller bearing* dengan 2 baris. Bagian-bagian *bearing* ini yaitu terdapat *outer ring*, *roller*, *cage*, dan *inner ring*. Fungsi *cage* yaitu sebagai pembatas agar *roller* satu

dan yang lain tidak berhimpitan. *Inner ring* dan *roller bearing* dapat dimiringkan seperti pada gambar 2.10. Hal ini menyebabkan *spherical roller bearing* memiliki kemampuan untuk mengatasi *misalignment* dengan batas kemiringan yang telah ditentukan.



Gambar 2. 9 *Spherical roller bearing* dan bagian-bagiannya (SKF *Rolling Bearing Catalogue*, 2016:880).



Gambar 2. 10 *Roller* dan *inner ring* dapat dimiringkan untuk mengatasi *misalignment* (SKF *Rolling Bearing Catalogue*, 2016:880).

2.6 Baja

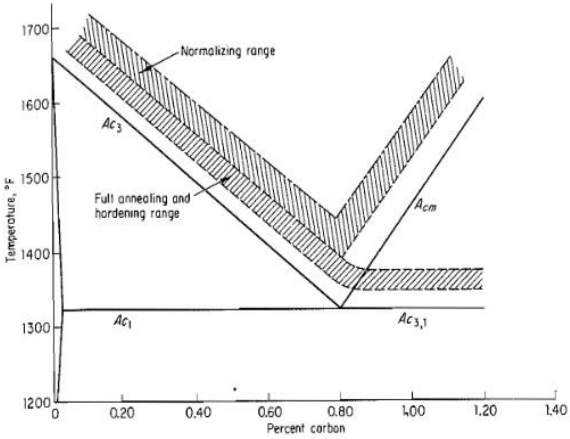
Baja merupakan logam paduan dengan besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya (Purwanto & Syafaat, 2017:1). Berdasarkan komposisi kimianya, baja dibedakan menjadi baja karbon dan baja paduan. Baja karbon merupakan logam paduan besi dan karbon dimana terdapat penambahan unsur mangan (Mn) dan silikon (Si) secara sengaja dengan jumlah tertentu (Avner, 1974:349). Sifat yang dimiliki baja karbon yaitu *hardenability* dan keuletan rendah namun kekuatannya tinggi, sedangkan baja paduan merupakan logam paduan besi dan karbon dimana terdapat penambahan beberapa unsur lain secara sengaja dengan jumlah tertentu (Avner, 1974:349). Fungsi baja paduan yaitu untuk meningkatkan *hardenability*, meningkatkan ketangguhan, meningkatkan sifat tahan aus dan tahan korosi.

Baja karbon dibagi menjadi baja karbon rendah, menengah, dan tinggi berdasarkan komposisi karbonnya. Baja karbon rendah memiliki komposisi karbon < 0.25%. Baja ini memiliki keuletan dan ketangguhan yang tinggi sehingga mudah dilakukan pembentukan. Contoh penggunaan baja karbon rendah yaitu berupa *sheet* pada kaleng. Baja karbon menengah memiliki komposisi karbon antara 0.25% hingga 0.60%. Baja ini memiliki *hardenability* yang rendah. Penggunaan baja karbon menengah yaitu untuk roda gigi, *crankshaft*, dan roda kereta api. Baja karbon tinggi memiliki komposisi karbon antara 0.60% hingga 1.4%. Baja ini merupakan baja yang paling kuat dan keras, namun keuletannya rendah. Contohnya yaitu pegas dan mata pisau.

2.7 Perlakuan Panas

Perlakuan panas merupakan kombinasi proses pemanasan dan pendinginan dengan waktu yang telah ditentukan dan diaplikasikan pada logam atau paduan padat bertujuan untuk memperoleh sifat mekanik yang diinginkan (Avner, 1974:249). Terdapat berbagai macam jenis perlakuan panas, salah satunya yaitu annealing.

Anneling merupakan perlakuan panas yang bertujuan untuk melunakkan baja. Annealing dilakukan dengan memanaskan baja hingga temperatur tertentu lalu mendinginkannya secara lambat di dalam tungku. Temperatur pemanasan baja *hypoeutectoid* sekitar 50° F diatas garis temperatur kritis atas (A_3), sedangkan temperatur pemanasan baja *hypereutectoid* sekitar 50° F diatas garis temperatur kritis bawah ($A_{3,1}$). Gambar 2.11 merupakan letak temperatur annealing pada baja *hypoeutectoid* dan *hypereutectoid.*



Gambar 2. 11 Temperatur pemanasan baja *hypoeutectoid* (0% - 0.8% C) yaitu sekitar $\mathbf{50^{o}F}$ diatas garis temperatur kritis atas (A_3), sedangkan pada baja *hypereutectoid* (0.8% - 2% C) yaitu sekitar $\mathbf{50^{o}F}$ diatas garis temperatur kritis bawah ($A_{3,1}$) (Avner, 1974:253).

Perubahan struktur mikro yang terjadi pada baja *hypoeutectoid* dan *hypereutectoid* berbeda. Baja *hypoeutectoid* yang dipanaskan pada temperatur pemanasannya, struktur mikro berubah menjadi *austenite*. Pendingan secara lambat mengubah *austenite* menjadi *ferrite* dan *pearlite*. Baja *hypereutectoid* yang dipanaskan pada temperatur pemanasannya akan menghasilkan struktur mikro

austenite. Pendinginan secara lambat mengubah *austenite* menjadi *pearlite* dan *cementite*.

2.8 Getaran

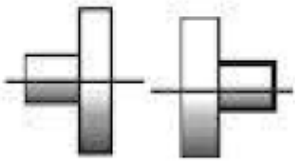
Getaran merupakan suatu pergerakan yang terjadi secara berulang pada sumbunya (Rao, 2011:13). Setiap komponen mesin yang beroperasi memiliki getaran yang wajar. Hal ini juga terjadi pada poros. Poros yang berputar dalam kondisi normal, tidak sepenuhnya lurus melainkan melengkung. Terdapat efek *whirling shaft* pada poros dimana kecepatan poros sama dengan kecepatan kritisnya (Rao, 2011:785). Kecepatan kritis merupakan kecepatan yang menyebabkan poros berputar dengan kelengkungan maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa efek *whirling shaft* menyebabkan timbul getaran yang tinggi.

2.9 *Misalignment*

Misalignment merupakan ketidaklurusan yang terjadi antar poros (Febrihantoro, 2012:1). Hal ini menyebabkan poros tidak berputas pada sumbunya. Terdapat berbagai macam *misalignment* sebagai berikut:

1. *Parallel Misalignment*

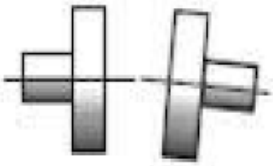
   Parallel misalignment merupakan kondisi ketika poros satu dan yang lainnya tidak sejajar sehingga terjadi perbedaan ketinggian seperti pada gambar 2.11



Gambar 2. 12 *Parallel misalignment* (Etsworld, 2018)

2. *Angular Misalignment*

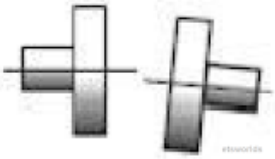
   Angular misalignment terjadi apabila 2 poros membentuk sudut namun dengan ketinggian yang sama. *Angular misalignment* ditunjukkan pada gambar 2.12.



Gambar 2. 13 *Angular misalignment* (Etsworld, 2018)

3. *Combination Misalignment*

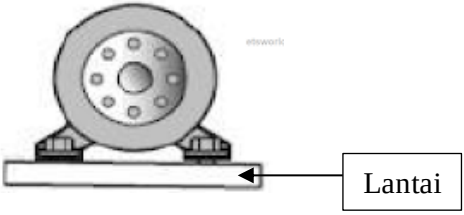
Combination misalignment yaitu apabila posisi antar 2 poros membentuk sudut dengan ketinggian yang berbeda seperti pada gambar 2.13



Gambar 2. 14 *Combination misalignment* (Etsworld, 2018)

4. Softfoot

Softfoot terjadi apabila mesin diletakkan diatas lantai sehingga kurang stabil. Ketidakstabilan ini dapat terjadi karena material dudukannya. Gambar 4.14 menunjukkan *softfoot.*



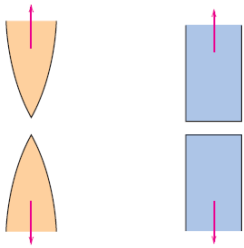
Gambar 2. 15 *Softfoot* (Etsworld, 2018**)**

2.10 Patahan

Patahan merupakan fenomena terbaginya benda menjadi dua bagian akibat adanya tegangan. Terdapat 4 macam tegangan yang dapat menyebabkan patahan yaitu *tension, compression, shear,*

and *torsional*. Berdasarkan proses patahnya, patahan dibagi menjadi 2 yaitu patah getas dan patah ulet.

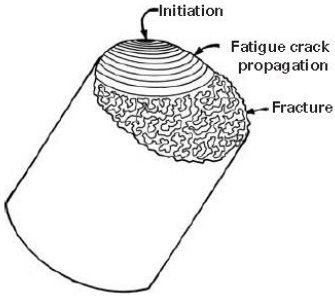
Proses patahan material ulet tidak berlangsung cepat. Terdapat fenomena pemanjangan material terlebih dahulu sebelum patah disebut dengan *necking*. Gambar 2.15 menunjukkan bentuk patah ulet akibat tegangan tension. Hal ini berbeda dengan patah getas meskipun mengalami tegangan yang sama dengan patah ulet. Proses patah getas berlangsung cepat dan tidak terjadi pemanjangan material terlebih dahulu seperti pada gambar 2.16.



Gambar 2. 16 (a) Patah ulet; (b) Patah getas (Callister, 2007:209)

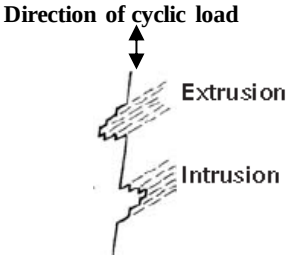
2.11 Kelelahan (*Fatigue*)

Kelelahan (*Fatigue*) merupakan kerusakan lokal, progresif, dan permanen pada material akibat mendapat tegangan berulang-ulang yang besarnya jauh dibawah tegangan luluhnya (ASM Vol 19, 1996:148). Terdapat tiga tahap terjadinya kelelahan yaitu tahap awal retak (*crack initiation*), tahap perambatan retak (*crack propagation*), dan tahap patah akhir (*final fracture*) yang ditunjukkan dengan skema permukaan patahan pada gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Skema permukaan patahan yang menunjukkan tahap awal retak (*initiation crack*), tahap perambatan retak (*crack propagation*), dan tahap patah akhir (*final fracture*) (Meyers & Chawla, 2009:731 & 714).

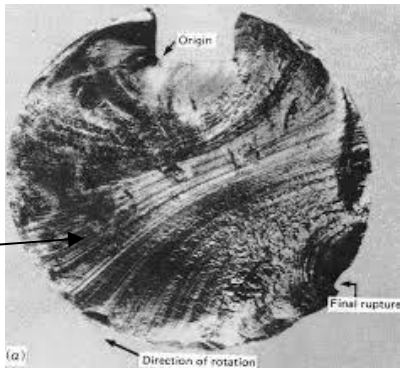
Tahap awal retak (*initiation crack*) terjadi pada permukaan komponen. Tegangan berulang-ulang pada daerah yang memiliki konsentrasi tegangan tinggi menyebabkan dislokasi. Dislokasi mengakibatkan terjadinya deformasi plastis dan diskontinuitas permukaan sehingga terbentuk *extrution* dan *intrution*. Gambar 2.18 merupakan bentuk *extrution* dan *intrution* sebagai awal retakan pada permukaan komponen.



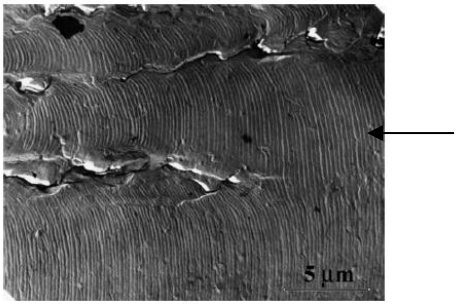
Gambar 2. 18 *Extrution* dan *intrution* pada permukaan komponen sebagai awal retak (Meyers & Chawla, 2009:728).

Tahap perambatan retak (*crack propagation*) ditandai dengan adanya *beachmarks*, *striation*, dan *ratchet marks*. *Beachmarks* merupakan garis hasil perambatan retak yang dapat menunjukkan

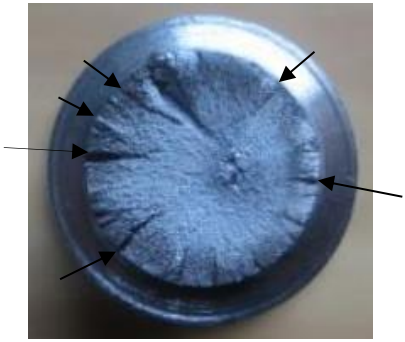
lokasi awal retak. *Beachmark* dapat dilihat secara langsung pada permukaan patahan. Besar jarak antar *beachmark* terbentuk berdasarkan ada tidaknya tegangan. Gambar 2.9 merupakan *beachmark* pada permukaan patahan. Setiap *beachmark* terdiri dari ribuan *striations*. *Striation* merupakan garis yang terbentuk akibat ujung retak merambat setiap satu siklus pembebanan ditunjukkan pada gambar 2.20 (Meyers & Chawla, 2009:725). *Striation* berukuran mikroskopis sehingga harus menggunakan alat bantu untuk melihatnya. *Ratchet marks* merupakan pertemuan antar *beachmarks* dari beberapa lokasi awal retak. Gambar 2.21 menunjukkan *ratchet marks* pada permukaan patahan.



Gambar 2. 19 *Beachmarks* terlihat jelas ditunjukkan dengan tanda panah sehingga dapat diketahui lokasi awal retak dan patahan akhir (Avner, 1974:645).

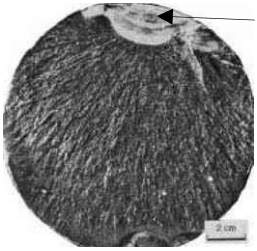


Gambar 2. 20 *Striation* yang dilihat menggunakan mikroskop (Meyers & Chawla, 2009:732).



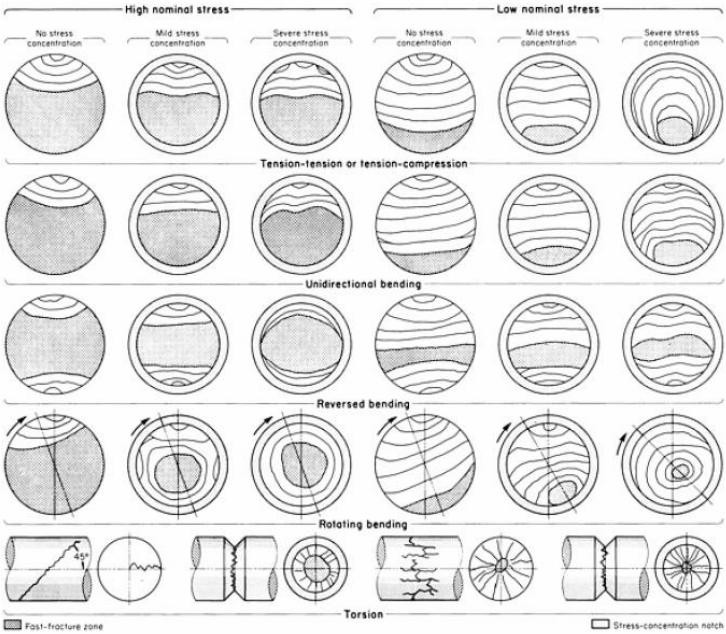
Gambar 2. 21 *Ratchet marks* yang terbentuk akibat pertemuan antar *beachmarks* ditunjukkan oleh tanda panah (Jokosisworo & Jatmiko, 2012:47).

Tahap patah akhir (*final fracture*) terjadi ketika komponen tidak mampu lagi menahan beban yang diterima. Patahan terjadi dengan cepat dan membentuk permukaan patahan yang kasar ditunjukkan pada gambar 2.22.



Gambar 2. 22 Bentuk permukaan patah akhir akibat kelelahan berada pada daerah yang paling luas ditunjukkan dengan tanda panah (Callister & Rethwisch, 2009:210).

Berdasarkan (ASM Vol 12, 1987:216), terdapat berbagai macam bentuk pola patahan yang berbeda-beda. Hal ini terjadi akibat adanya besar tegangan yang berbeda pada masing-masing patahan ditunjukkan pada gambar 2.23. Pada gambar tersebut, daerah berwarna terang dan bergaris menunjukkan daerah perambatan retak. Daerah yang lebih gelap menunjukkan daerah patah akhir. Permukaan patahan yang mengalami tegangan tinggi memiliki daerah patah akhir lebih luas dan daerah perambatannya semakin sempit. Semakin besar konsentrasi tegangan yang ada, maka semakin banyak timbul awal retak dari bidang yang berbeda.



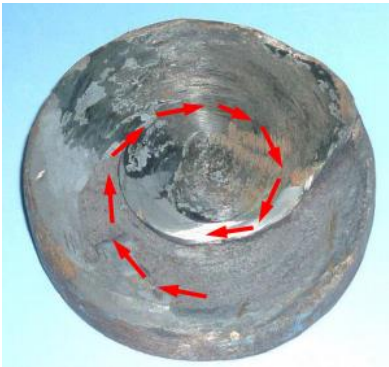
Gambar 2. 23 Permukaan patahan berpenampang lingkaran akibat kelelahan dengan tegangan yang berbeda-beda (ASM Vol. 12, 1987:216).

2.12 Tinjauan Pustaka

Pada tahun 2014 Hadi Sunandrio dan Sutarjo menganalisa kerusakan shaft pompa submersible yang ada pada jurnal Analisis Kegagalan Shaft Pompa Submersible pada Unit Pengeboran Minyak Bumi. Kegagalan terjadi pada daerah yang mengalami perubahan diameter dan terdapat permukaan patahan dengan alur puntir ditunjukkan pada gambar 2.24

a) b)

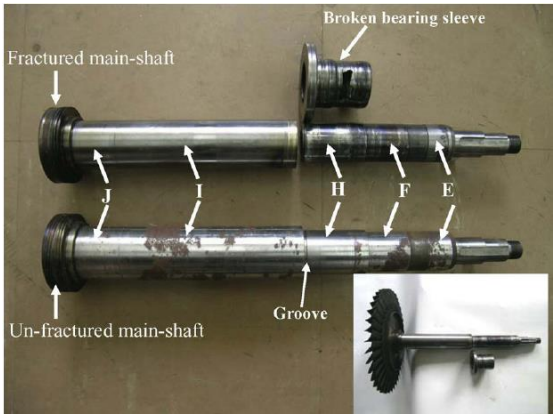
Gambar 2. 24 a) Lokasi terjadinya patahan; b) Permukaan patahan poros (Sunandrio & Sutarjo, 2014: 3).



Gambar 2. 25 Bentuk permukaan patahan. Terdapat alur-alur deformasi akibat puntiran patahan (Sunandrio & Sutarjo, 2014:5).

Penelitian tersebut menunjukkan bahwa patahan terjadi akibat gesekan antara permukaan poros dan *bearing*. Gesekan tersebut menimbulkan panas sehingga poros dan *bearing* saling menempel yang ditandai dengan adanya deformasi pada permukaan poros. Hal tersebut mengakibatkan poros terhenti secara tiba-tiba dan menimbulkan adanya beban kejut. Motor yang masih berputar menyebabkan timbulnya gaya puntir pada poros hingga patah. Patahan terletak pada daerah yang memiliki perbedaan diameter dimana merupakan daerah yang memiliki konsentrasi tegangan tinggi.

Xu Xiaolei dan Yu Zhiwei melakukan analisis kegagalan pada tahun 2008 dengan jurnal yang berjudul *Failure Analysis of a Locomotive Turbocharger Main Shaft*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa patahan terjadi berawal dari adanya *turbocharger* yang beroperasi tidak semestinya. Hal tersebut menyebabkan adanya gaya gesek yang tinggi antara *bearing sleeve* dengan poros. Gesekan tersebut menyebabkan naiknya suhu sehingga menurunkan *fatigue strength* pada *fillet* antara bagian I dan H seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.26. Pada daerah tersebut poros mengalami patah. Permukaan patahan ditunjukkan pada gambar 2.27.



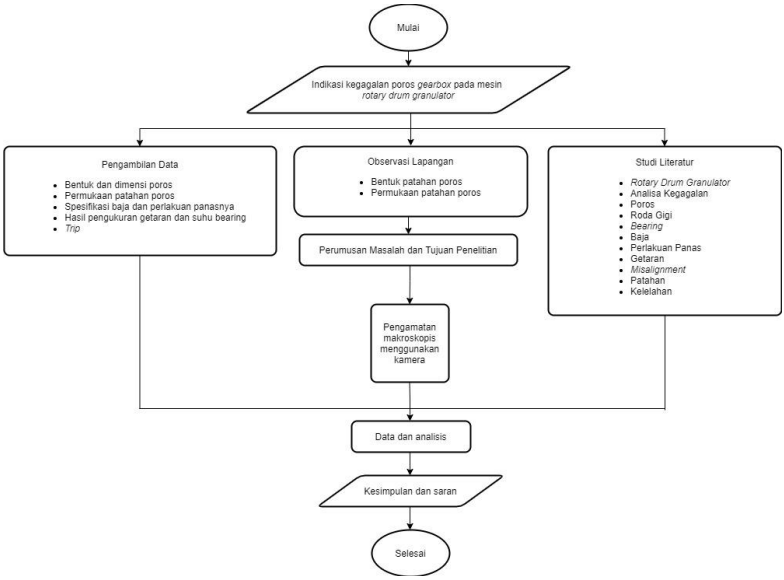
Gambar 2. 26 Lokasi patahan poros pada daerah yang memiliki perbedaan diameter yaitu antara I dan H (Xiaolei & Zhiwei, 2008:2).

Gambar 2. 27 Permukaan patahan poros yang menunjukkan adanya beberapa awal retak yang ditandai dengan adanya *ratchet marks* (Xiaolei & Zhiwei, 2008:3).

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam melakukan penelitian ini digambarkan melalui diagram alir sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Peralatan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Jangka sorong
2. Kamera selular
3. Kamera digital
4. Lup

3.3 Sampel Material

Material yang digunakan pada penelitian ini yaitu satu poros *gearbox* mesin *Rotary Drum Granulator* yang patah. Material yang digunakan ditunjukkan pada gambar 3.2.

Gambar 3. 2 Poros *gearbox* mesin *rotary drum granulator* yang patah.

3.4 Langkah-Langkah Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian kegagalan ini adalah sebagai berikut:

3.4.1 Observasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan setelah ditemukan adanya kegagalan poros pada *gearbox* mesin *rotary drum granulator*. Pada saat observasi lapangan, dapat diketahui bentuk patahan poros dan permukaan patahannya. Gambar 3.3 merupakan permukaan patahan poros.

Gambar 3. 3 Permukaan patahan poros.

3.4.2 Studi Literatur

Studi literatur merupakan proses yang dilakukan untuk memberikan informasi terhadap faktor-faktor yang berkaitan dengan kegagalan yaitu *rotary drum granulator*, analisa kegagalan, poros, roda gigi, *bearing*, baja, perlakuan panas, getaran, misalignment, patahan, dan kelelahan.

3.4.3 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan untuk mengetahui tanda-tanda awal kerusakan dan mekanismenya. Data-data yang didapatkan yaitu meliputi bentuk dan dimensi poros, permukaan patahan poros, spesifikasi baja dan perlakuan panasnya, *trip*, serta hasil pengukuran getaran dan suhu *bearing*. Berdasarkan data tersebut dibuat tabel pengambilan data yang ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Tabel Pengambilan Data

No.	Observasi		Tujuan	Data yang diperoleh
1.	Bentuk dan dimensi poros		Mengetahui pengaruh elemen mesin lain terhadap patahnya poros	
2.	Permukaan patahan poros		Mengetahui pola dan jenis patahan poros	
3.	Spesifikasi baja dan perlakuan panasnya	Spesifikasi baja	Mengetahui komposisi kimia	

		Perlakuan panas pada baja	Mengetahui sifat mekanik baja	
4.	Hasil pengukuran getaran dan suhu *bearing*		Mengetahui perilaku *bearing* dan pengaruhnya terhadap patahnya poros	
5.	*Trip*		Mengetahui pengaruh *trip* terhadap patahnya poros	

3.4.4 Perumusan Masalah dan Tujuan Penelitian

Analisa kegagalan ini dilakukan untuk mengetahui penyebab kegagalan poros *gearbox* dan mengetahui mekanisme kegagalan yang terjadi.

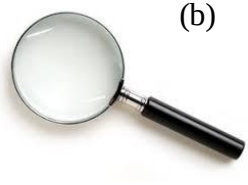
3.4.5 Pengamatan Makroskopis

Pengamatan makroskopis yaitu pengamatan secara visual terhadap kerusakan yang meliputi dimensi, warna, dan bentuk permukaan patahan. Alat yang digunakan yaitu jangka sorong, kamera selular, kamera digital, dan lup seperti pada gambar 3.4. Tabel pengamatan makroskopis ditunjukkan pada tabel 3.2.

(a)

(b)

(c)



(d)

Gambar 3. 4 (a) Jangka sorong digunakan untuk mengetahui dimensi komponen; (b) Kamera selular; (c) Kamera digital; (d) Lup digunakan untuk mengamati bentuk permukaan patahan.

Tabel 3. 2 Tabel Pengamatan Makroskopis

Observasi	Tujuan	Data yang diperoleh
Permukaan patahan poros *gearbox* dan kondisi sekitarnya	• Mengetahui pola patahan pada permukaan poros *gearbox*. • Mengetahui jenis patahan. • Mengetahui pengaruh kondisi sekitar poros terhadap patahannya.	

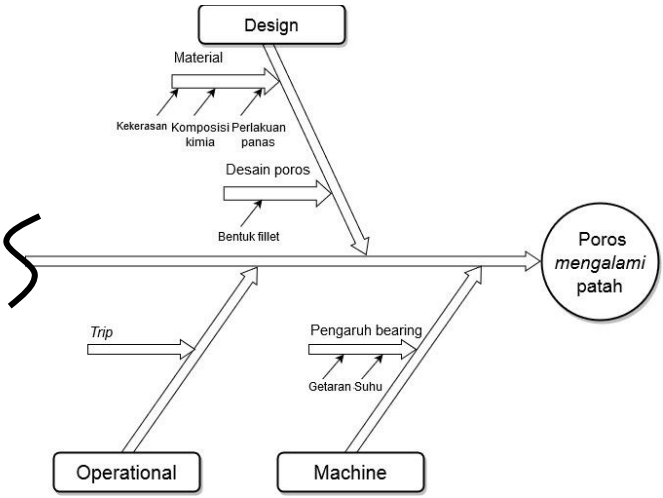
3.4.6 Pengolahan Data dan Analisis

Pengolahan data dan analisis dilakukan setelah studi literatur, pengambilan data, dan pengamatan secara makroskopis untuk mengetahui penyebab dan mekanisme terjadinya kegagalan poros pada *gearbox* mesin *rotary drum granulator*.

BAB IV
DATA DAN ANALISIS

4.1 *Fishbone Diagram Analysis*

Berdasarkan data-data yang telah dikumpulkan, diperoleh beberapa hal yang mempengaruhi kegagalan pada poros yaitu ditunjukkan pada *fishbone diagram analysis* sebagai berikut:



Gambar 4. 1 *Fishbone diagram analysis* patahnya poros *gearbox.*

4.2 Poros

4.2.1 Komposisi Kimia, Kekerasan, dan Perlakuan Panas

Jenis material poros, komposisi kimia, kekerasan, dan perlakuan panasnya tidak didapatkan melalui pengujian langsung, melainkan berdasarkan data sertifikat dari perusahaan. Jenis material poros yang digunakan yaitu baja paduan AISI 4340 dengan *ruling section* 150 mm. *Ruling section* merupakan diameter maksimum batang dimana sifat mekanik dicapai setelah dilakukan perlakuan panas (Engnet, 2019). Poros dibuat melalui proses *hot rolled* kemudian mengalami perlakuan panas *annealing.*

Baja paduan AISI 4340 poros dan baja paduan AISI 4340 berdasarkan standar memiliki komposisi kimia dan kekerasan yang ditunjukkan pada tabel 4.1. Data pada tabel tersebut menunjukkan bahwa komposisi kimia dan kekerasan poros sesuai dengan standarnya.

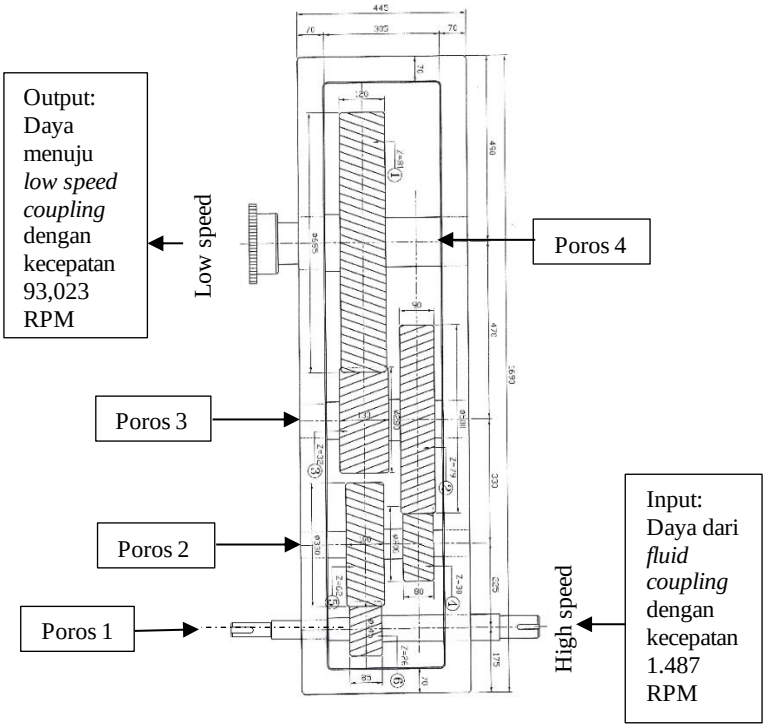
Tabel 4. 1 Komposisi Kimia dan Kekerasan

	Baja paduan AISI 4340 (Standar)	Baja paduan AISI 4340 (Poros)
Komposisi Kimia:		
C	0.38 – 0.43	0.40
Mn	0.60 – 0.80	0.77
P	≤ 0.030	0.017
S	≤ 0.040	0.008
Si	0.15 – 0.35	0.24
Ni	1.65 – 2.00	1.74
Cr	0.70 – 0.90	0.86
Mo	0.20 – 0.30	0.24
Cu	≤ 0.35	0.01
Brinell Hardness	≤ 255	223

Berdasarkan (Budynas & Nisbett, 2015:353), material yang lebih baik digunakan untuk poros yaitu baja karbon rendah atau karbon menengah. Baja tersebut memiliki keuletan lebih tinggi daripada baja karbon tinggi sehingga dapat mengantisipasi adanya kelelahan. Hal ini sesuai dengan komposisi kimia poros dimana kandungan karbonnya 0.40% yaitu merupakan baja karbon menengah. Poros yang termasuk baja karbon menengah dan mengalami perlakuan panas *annealing* akan menghasilkan sifat ulet dan tangguh.

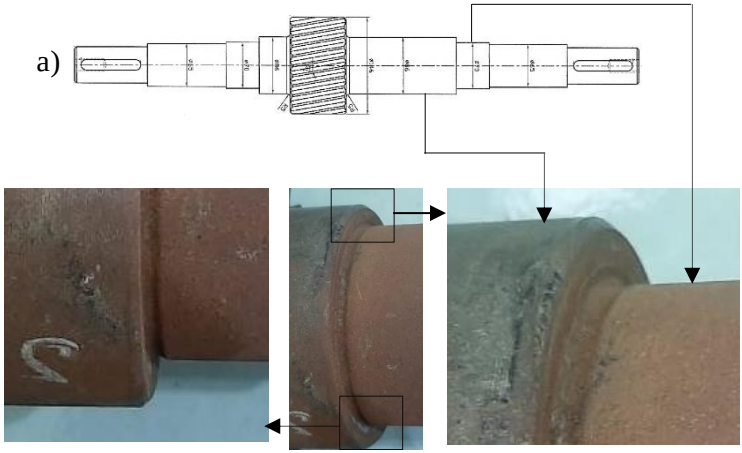
4.2.2 Bentuk *Fillet* Poros

Lokasi poros yang patah dapat diketahui melalui gambar susunan dalam gearbox sebagai berikut:

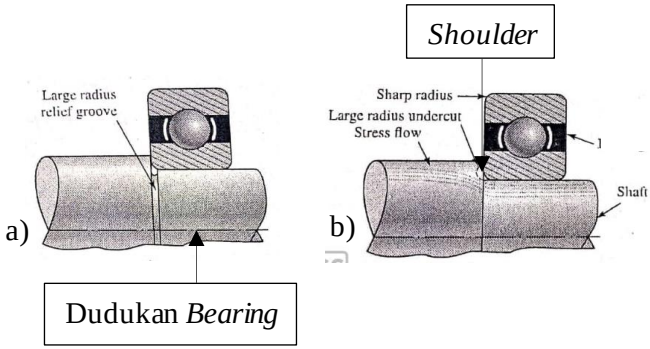


Gambar 4. 2 Tampak atas susunan poros dalam *gearbox*. Poros 1 yang patah merupakan poros yang berhubungan dengan motor melalui *fluid coupling*.

Poros patah tepat pada daerah perubahan diameter. Pada daerah tersebut terdapat 2 bentuk *fillet* yaitu *large radius undercut* dan *large radius relief groove* (gambar 4.3). Bentuk *large radius relief groove into the small diameter* yaitu berupa cekungan pada daerah yang mengalami perubahan diameter. *Large radius undercut into the shoulder* juga berbentuk cekungan yang berada dalam *shoulder*.



Gambar 4. 3 a) Gambar sketsa poros 1; b) Bagian poros dimana terdapat 2 *fillet*; c) Perbesaran *fillet* gambar b yang menunjukkan *large radius relief groove into the small diameter*; d) Perbesaran *fillet* gambar b yang menunjukkan *large radius undercut into the shoulder.*



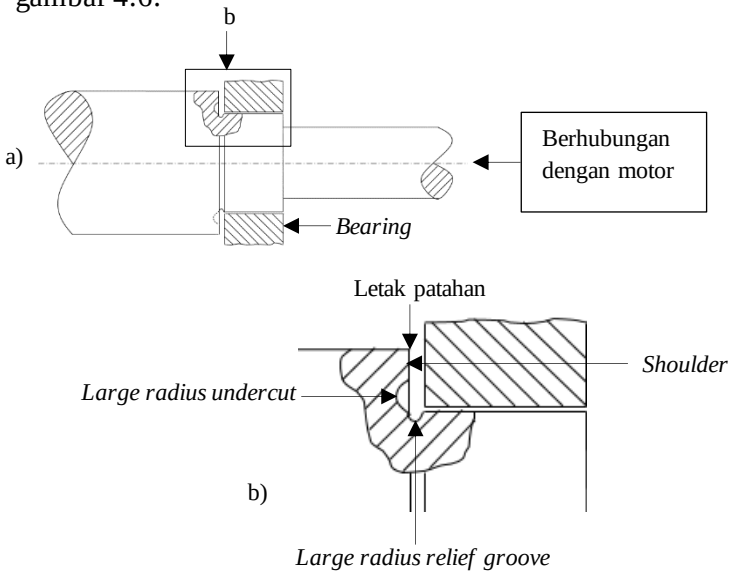
Gambar 4. 4 a) Gambar sketsa *large radius relief groove into the small diameter;* b) Gambar sketsa *large radius undercut into the shoulder* (Budynas & Nisbet, 2015:364).

Cekungan-cekungan tersebut berfungsi untuk memperbesar *fillet* agar mengurangi timbulnya konsentrasi tegangan.

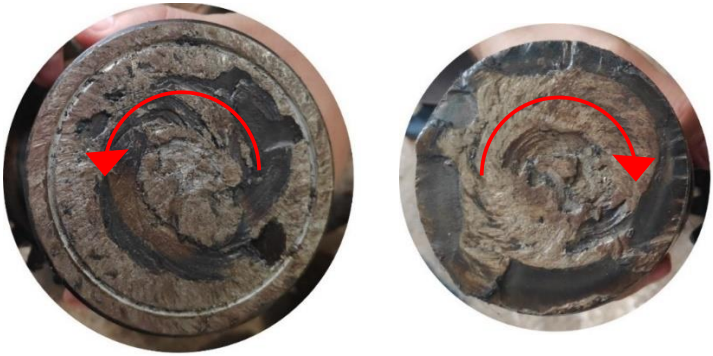
Berdasarkan gambar 4.3, daerah yang mengalami perubahan diameter pada poros terdapat *large radius relief into the small diameter* dan *large radius undercut into the shoulder*. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk poros telah dibuat agar mampu mengurangi adanya konsentrasi tegangan.

4.2.3 Permukaan Patahan Poros

Patahan poros terjadi pada *fillet* yang ditunjukkan oleh gambar sketsa 4.5. Kerusakan tersebut menghasilkan permukaaan patahan kiri (L) dan kanan (R) seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.5 a) Gambar sketsa poros dimana terdapat *fillet* dan letak patahan. Poros bagian kanan berhubungan dengan motor; b) Bagian poros yang mengalami perubahan diameter dimana terdapat 2 *fillet*. Letak patahan berada di perbatasan 2 *fillet*.

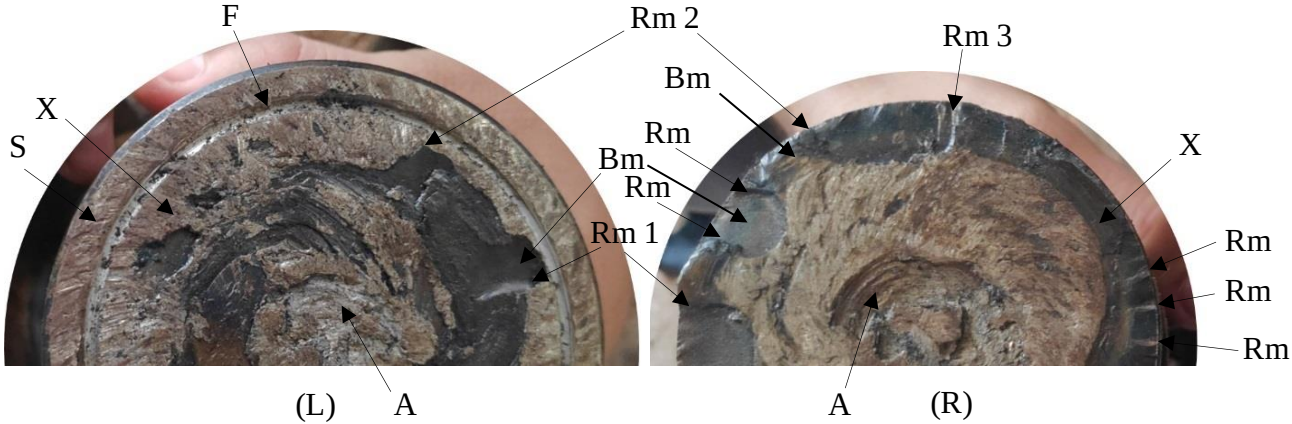


Permukaan patahan kiri (L) Permukaan patahan kanan (R)

Gambar 4. 6 Dua permukaan patahan menunjukkan alur yang berlawanan. Permukaan patahan R searah putaran jam atau *clockwise* (CW), sedangkan permukaan patahan L berlawanan arah jarum jam atau *counterclockwise* (CCW). Hal ini menunjukkan dua permukaan patahan terdapat dalam satu bidang yaitu lokasi patahan.

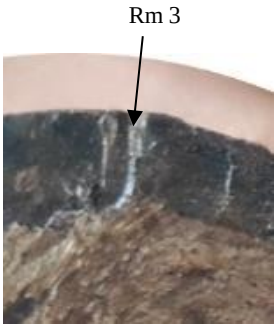
Pada 2 permukaan patahan tersebut tampak adanya alur putaran dengan arah yang berlawanan ditunjukkan dengan panah merah. Adanya alur putaran ini merupakan tanda bahwa terdapat gaya puntir ketika patah (Sunandrio & Sutarjo, 2014:5). Berdasarkan bentuk permukaan patahan R dan L menunjukkan bahwa poros mengalam *torsional fatigue* (ASM Vol. 12, 1987:216).

Permukaan patahan kiri (L) dan kanan (R) diambil pada bagian yang bersesuaian untuk melihat gambar secara detail seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7 Hal ini dilakukan untuk memperoleh data yang saling melengkapi. Pada permukaan patahan terdapat banyak *ratchet marks* yang tidak sama panjang, dimulai dari permukaan poros menuju pusatnya dan terletak tidak pada satu bidang (gambar 4.8).



Keterangan: Rm = *ratchet marks*
Bm = *beachmark*
S = *shoulder*
F= *large radius undercut fillet*
A = daerah patah akhir
X = daerah halus pada permukaan R dan daerah kasar pada permukaan L

Gambar 4. 7 Permukaan patahan L dan R yang bersesuaian dimana terdapat perbedaan tekstur permukaan, jumlah *ratchet marks*, dan daerah patah akhir.



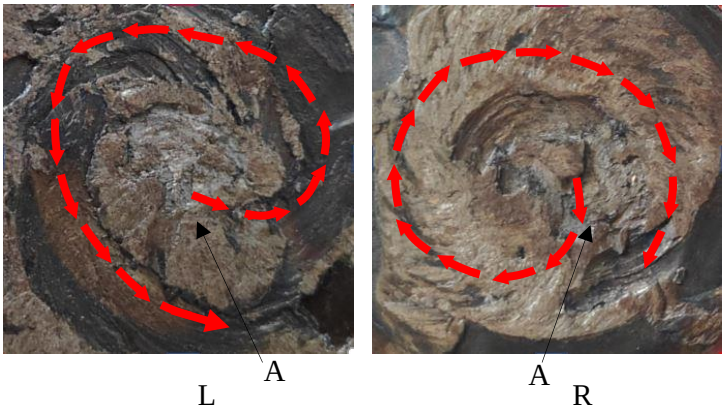
Gambar 4. 8 Salah satu contoh *ratchet marks* dimana tidak terletak pada satu bidang yang ditunjukkan dengan adanya beda ketinggian.

Ratchet marks merupakan pertemuan dari dua *beachmarks*, sedangkan *beachmarks* merupakan perambatan dari awal retak. Jadi banyaknya *ratchet marks* timbul akibat banyak awal retak yang menunjukkan adanya konsentrasi tegangan tinggi (Avner, 1974:643). Hal ini diperkuat dengan terjadinya patahan pada daerah yang mengalami perubahan diameter dimana terdapat *fillet*.

Tidak seperti permukaan patah lelah pada umumnya, pada permukaan patahan R dan L tidak tampak adanya alur perambatan retak akibat beban siklik. Hal ini menunjukkan adanya perambatan retak yang cepat pada sekali siklik. Awal retak-awal retak merambat ke arah pusat poros yang kemudian didorong ke arah radial oleh gaya tangensial akibat putaran poros. Hal ini diperkuat dengan adanya *ratchet marks* yang memiliki panjang berbeda-beda. *Ratchet marks* pada pasangan permukaan patahan seharusnya saling melengkapi, namun tidak demikian pada permukaan patahan R dan L. *Ratchet marks* pada permukaan R yang memiliki cerminan pada permukaan L ditunjukkan dengan tanda panah Rm 1 dan Rm 2 saja. Pasangan *ratchet marks* selain Rm 1 dan Rm 2 tidak ada cerminannya pada permukaan L. Hal tersebut terjadi akibat adanya sebagian permukaan L yang bergesekan dengan permukaan R pada saat patah. Terjadinya

gesekan juga ditunjukkan dengan adanya perbedaan tekstur permukaan R dan L yang bersesuaian ditunjukkan dengan panah X. Tekstur permukaan R halus, sedangkan pada permukaan L terdapat alur putaran akibat gesekan. Bukti lain adanya gesekan yaitu permukaan *shoulder* yang seharusnya halus, terdapat alur putaran pada arah yang berbeda-beda ditunjukkan dengan panah S.

Tanda panah A menunjukkan daerah patah akhir permukaan patahan L dan R yang diperbesar pada gambar 4.9. Terdapat perbedaan daerah patah akhir dimana pada permukaan



Gambar 4. 9 Daerah patah akhir dimana terdapat ketinggian permukaan yang berbeda (panah A) dan alur putaran dengan sumbu berbeda-beda menunjukkan adanya deformasi plastis dan gesekan.

L menjorok ke luar, sedangkan pada permukaan R menjorok ke dalam. Hal ini menunjukkan adanya deformasi plastis terlebih dahulu, kemudian terjadi patah ulet. Terdapat alur putaran pada daerah patah akhir menunjukkan adanya gesekan pada saat patah (Triantafyllidis dkk, 2009:25).

4.3 Roda Gigi

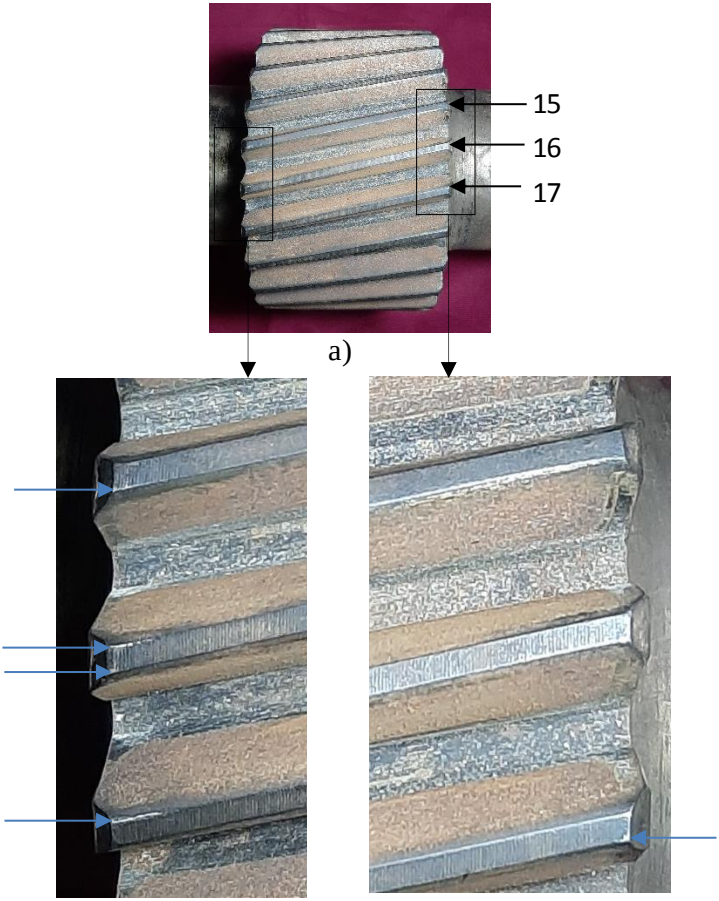
Poros yang patah merupakan satu kesatuan dengan roda gigi ditunjukkan pada gambar 4.10.

a) b)

Gambar 4. 10 a) Poros yang merupakan satu kesatuan dengan roda gigi; b) Roda gigi apabila dilihat dari sisi kanan.

Apabila poros berputar pada sumbu yang berubah-ubah, maka efeknya akan tampak pada roda gigi. Oleh sebab itu, dilakukan pengamatan terhadap roda gigi untuk melihat perubahan yang terjadi pada gigi.

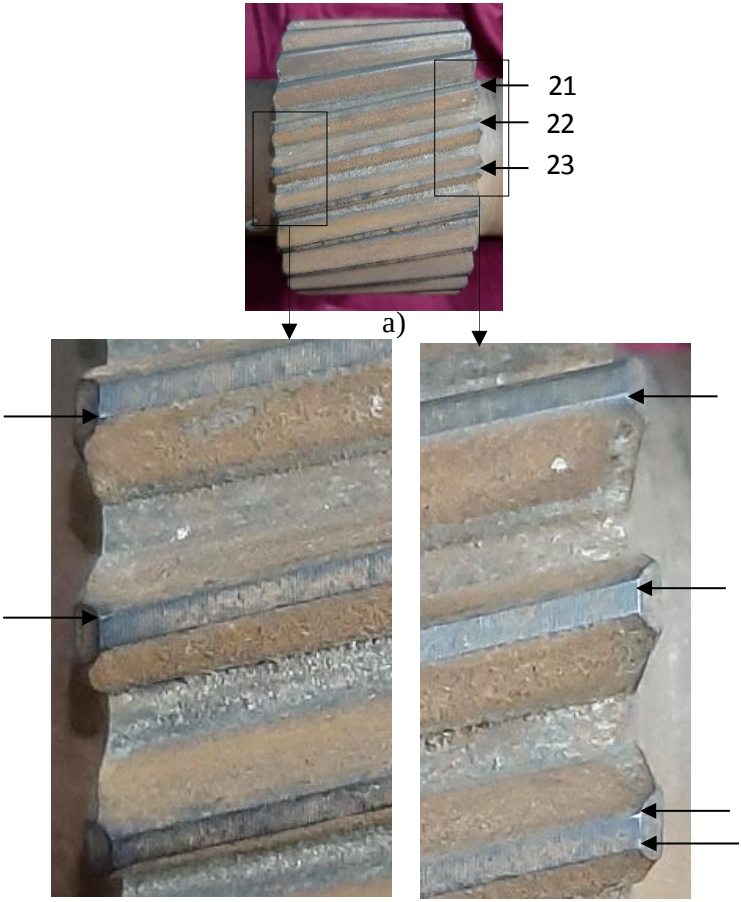
Pengamatan dilakukan pada beberapa sampel gigi yang diambil secara acak seperti pada gambar 4.11 hingga 4.13.



a)

b) c)

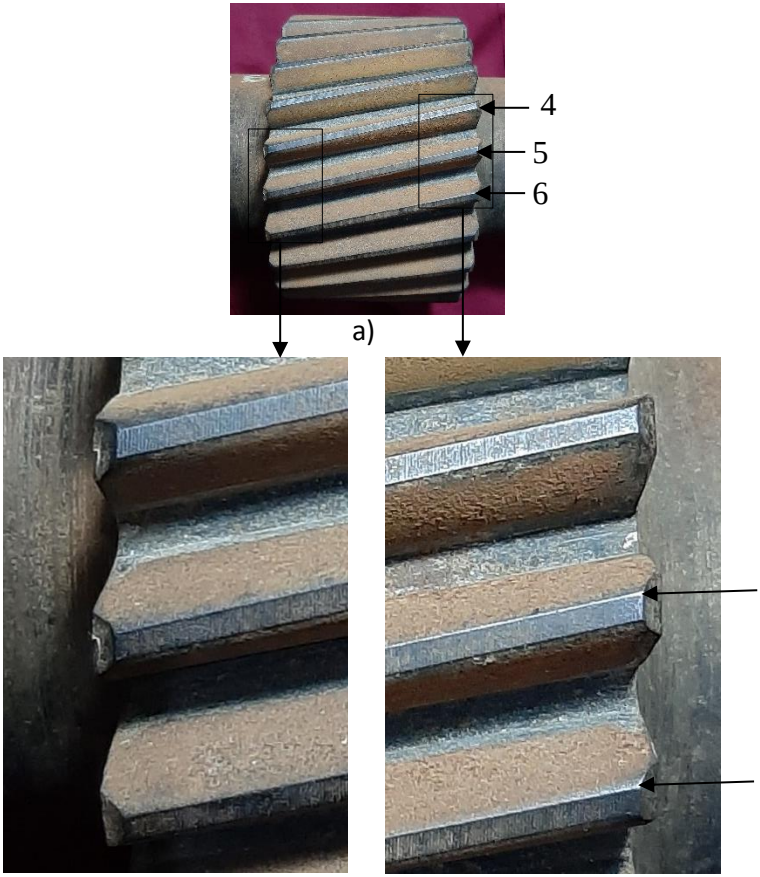
Gambar 4. 11 a) Gigi 15, 16, dan 17 yang diamati. Lokasi keausan disebelah kiri lebih banyak yaitu pada gigi 15, 16, dan 17 (gambar b), sedangkan di sebelah kanan hanya pada gigi 17 (gambar c).



a)

b) c)

Gambar 4. 12 a) Gigi 21, 22, dan 23 yang diamati. Lokasi keausan di sebelah kanan lebih banyak yaitu pada gigi 21, 22, dan 23 (gambar c), sedangkan di sebelah kiri hanya pada gigi 21 dan 22 (gambar b).



Gambar 4. 13 a) Gigi 4, 5, dan 6 yang diamati. Tidak ada keausan di sebelah kiri gigi (gambar b), sedangkan di sebelah kanan, gigi 5 dan 6 mengalami keausan (gambar c).

Hasil pengamatan pada roda gigi yang diambil secara acak menunjukkan bahwa terdapat roda gigi yang mengalami keausan pada ujung kanan, ujung kiri, maupun kedua ujung gigi. Adanya keausan ditunjukkan dengan warna yang mengkilap. Keausan yang terjadi pada ujung-ujung gigi secara acak menunjukkan bahwa

ujung-ujung gigi mengalami tekanan gesekan dengan roda gigi pasangannya dari poros yang lain secara bergantian.

4.4 Pengukuran Getaran dan Suhu *Bearing*

Bearing merupakan salah satu elemen mesin yang harus dikontrol secara rutin agar selalu beroperasi dengan semestinya. Cara pengontrolan *bearing* dilakukan dengan mengukur suhu dan getaran setiap *bearing* agar tidak melebihi batas yang diizinkan. Batas suhu maksimal yaitu 120°C, sedangkan batas getaran yang diizinkan ditunjukkan pada gambar 4.14. *Rotary drum granulator* menggunakan batas pada *group* 2 kolom *rigid* karena bekerja dengan daya 250 kW dan merupakan mesin yang menggunakan

Figure 1 Vibration Severity ISO 10816-3 : 2009

Vibration Severity		Goodness judement for machine group			
Value of Velocity -boundary-		Group2		Group1	
0.71 mm/s		A	A	A	A
1.4		B			
2.3			B	B	
2.8		C			
3.5					B
4.5		D	C	C	
7.1			D	D	C
11.0					D
Base state of Machine		Rigid	Flexible	Rigid	Flexible

Example of Goodness A: Good B: Satisfactory C: Unsatisfactory D: Unacceptable

Group 1 Huge Machine Output, 300kW~50MW
Group 2 Middle Machine Output, 15kW~300kW

Gambar 4. 14 Batas Getaran *Bearing*.

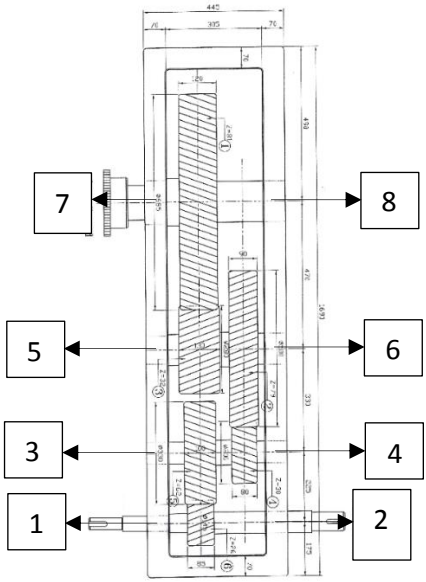
pondasi *rigid*. Pada gambar tersebut terdapat empat daerah dengan warna yang berbeda-beda. Tiap daerah menunjukkan kondisi *bearing* dengan keterangan sebagai berikut:

- Daerah A = *Good*
- Daerah B = *Satisfactory*

- Daerah C = *Unsatisfactory*
- Daerah D = *Unacceptable*

Daerah A menunjukkan getaran *bearing* dalam kondisi aman. Daerah B memiliki getaran yang lebih tinggi daripada daerah A, namun *bearing* tidak perlu diganti. Pada daerah C menunjukkan bahwa *bearing* harus diganti. *Bearing* mengalami kegagalan apabila besar getarannya termasuk pada daerah D.

Pengukuran suhu dilakukan dengan mengarahkan *thermogun* pada *house bearing*, sedangkan pengukuran getaran dilakukan dengan menempelkan *vibration meter* dengan tiga posisi yang berbeda yaitu vertikal, horizontal, dan aksial. Lokasi *bearing* pada *gearbox* ditunjukkan pada gambar 4.15.



Gambar 4. 15 Tampak atas susunan poros-poros dan *bearing* dalam *gearbox* dimana angka 1 sampai 8 menunjukkan nomor *bearing*. *Bearing* nomor 1 dan 2 menumpu poros yang berfungsi sebagai penggerak.

Pencatatan dan rekaman terakhir yang berkaitan dengan poros dan *bearing* ditunjukkan pada tabel 4.2. Pengukuran getaran dan suhu dilakukan setiap hari namun data tidak disimpan sehingga data terakhir yaitu hasil pengukuran yang dilakukan pada tanggal 7 Maret 2019. Pengukuran dilakukan pada *bearing* nomor 1, 3, dan 5 karena posisi *bearing* yang lain tidak memungkinkan untuk dilakukan pengukuran. Hasil pengukuran suhu ditunjukkan pada

Tabel 4. 2 Pencatatan dan Rekaman Terakhir pada Poros dan *Bearing*

No.	Waktu	Kegiatan	Keterangan
1 .	2011	Pemasangan *gearbox*	-
2.	7 Maret 2019	Pengontrolan suhu dan getaran *bearing* nomor 1, 3, dan 5	• Suhu bearing aman • *Bearing* nomor 1, 3, dan 5 mengalami getaran berlebih
3.	9 Maret 2019	Penggantian *bearing* nomor 1, 2, 3, dan 4	*Bearing* beroperasi dengan normal
4.	11 Maret 2019	Poros nomor 1 patah	-

Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Getaran *Bearing* pada 7 Maret 2019

Arah	Getaran *bearing* no. (mm/s)			Batas ijin getaran (mm/s)
	1	3	5	
Vertikal	5.4	4.7	3.1	Daerah A: < 1.4 (Good)
Horizontal	4.6	3.0	4.0	Daerah B: 1.4 – 2.7 (Satisfactory)
Aksial	2.7	3.3	3.6	Daerah C: 2.8 – 4.4 (Unsatisfactory)
				Daerah D: ≥ 4.5 (Unacceptable)

Tabel 4. 4 Hasil Pengukuran Suhu *Bearing*

Suhu *bearing* no. (^{O}C)			Batas ijin suhu (^{O}C)
1	3	5	
48	52	51	120

tabel 4.4. yang menunjukkan bahwa suhu poros tidak melebihi batas yang diizinkan. Tabel 4.3 menunjukkan adanya getaran tinggi pada *bearing* nomor 1, 3, dan 5 yang ditandai dengan daerah warna kuning. Getaran berlebih menimbulkan adanya suara yang bising. Penggantian *bearing* dilakukan pada *bearing* nomor 1, 2, 3, dan 4 untuk mengatasi getaran tersebut. Pada saat dilakukan penggantian *bearing*, dapat diketahui bahwa *bearing* nomor 1, 2, 3, dan 4 mengalami keausan dengan *inner ring* yang masih melekat dengan poros. Dua hari setelah penggantian *bearing*, poros yang ditumpu oleh *bearing* nomor 1 dan 2 mengalami patah tanpa adanya tanda-tanda apapun.

Pada penelitian ini tidak didapatkan bukti forensik bearing 1, 2, 3, dan 4 yang mengalami keausan, namun parahnya keausan dapat dilihat pada *bearing* yang mengalami kerusakan sama dari mesin lain seperti yang ditunjukkan gambar 4.16. Pada *bearing*

a) b)

Gambar 4. 16 Perbandingan *bearing* benar dengan *bearing* yang rusak dari mesin lain. Kerusakan *bearing* tersebut sama dengan keausan yang ada pada *bearing* yang dianalisis. a) Tampak depan; b) Tampak atas.

yang aus tersebut, jika posisi *inner ring* diputar dengan sudut tertentu dari *outer ring* (gambar 4.16), *roller* dapat dikeluarkan tanpa menggunakan alat. Seharusnya *bearing* yang benar yaitu meskipun posisi *inner ring* dikeluarkan, maka *roller* tidak bisa dikeluarkan seperti halnya pada *bearing* yang benar pada gambar 4.16. Kemungkinan besar keausan yang terjadi yaitu pada *roller*. Kerusakan yang parah pada *roller bearing* tercapai dalam kurun waktu yang lama. Keausan seperti itu, sesuai dengan adanya getaran yang besar (hasil pengukuran tabel 4.3) dan berpengaruh terhadap poros.

4.5 *Trip*

Semua elemen mesin akan bekerja dalam waktu yang lama sesuai umurnya apabila beban kerjanya dibawah batas yang diizinkan. Demikian halnya pada *rotary drum granulator* beserta perangkatnya. Apabila terjadi beban berlebih pada *drum*, maka motor akan terhenti secara otomatis yang berfungsi sebagai kontrol. Peristiwa ini disebut dengan *trip*. Beban muatan *drum* dikonversikan dalam satuan arus listrik pada motor dan *trip* terjadi apabila pemakaian arus mencapai 30 A. Besar arus normal yang digunakan yaitu mulai dari 18 A hingga 24 A. Berdasarkan

informasi yang didapatkan, *trip* terjadi rata-rata 3 kali dalam satu bulan sehingga dalam 8 tahun, *trip* telah terjadi berulang-ulang.

Record pemakaian arus motor ditunjukkan dalam bentuk grafik seperti pada gambar 4.17. Grafik tersebut didapatkan 14 jam sebelum poros patah dimana sumbu x menunjukkan waktu (jam) dan sumbu y menunjukkan arus listrik (A). Tidak didapatkan *record* pemakaian arus pada hari sebelum poros patah karena data terhapus secara otomatis oleh sistem.

Arus Listrik (A)

Waktu (jam)

Gambar 4. 17 Grafik pemakaian arus motor yang menunjukkan beban muatan *drum* dengan sumbu vertikal adalah arus listik (A) dan sumbu horizontal adalah waktu (jam). Grafik ini menunjukkan hasil *record* 14 jam terakhir sebelum poros patah. Poros patah tidak pada beban maksimal (30 A) yang ditunjukkan dengan tanda panah.

Poros patah tidak pada beban maksimal, namun adanya garis naik dan turun pada grafik menunjukkan bahwa beban muatan *drum* selalu berfluktuasi. Jika beban berfluktuasi hingga 30 A maka motor terhenti. Setelah motor mati, *drum* masih berputar karena kelembamannya, kemudian pada saat energinya habis, *drum* akan berputar ke arah yang berlawanan hingga berhenti. Setelah *drum*

berhenti, muatan dalam *drum* dikosongkan. Selanjutnya *drum* mulai beroperasi lagi seperti awal.

Pada saat *drum* berputar dengan arah berlawanan sebagai efek kelembaman, poros masih menahan beban lebih dari muatan *drum* tersebut. Beban lebih menyebabkan terjadinya penekanan yang berlebih pada roda gigi. Hal ini mengakibatkan adanya penekanan reaksi pada *bearing* ke arah yang berlawanan dengan arah penekanan pada roda gigi. *Trip* sering terjadi sehingga proses tersebut berulang dan menyebabkan kelelahan pada poros.

4.6 Ringkasan Analisis

Trip terjadi akibat adanya beban muatan *drum* yang melebihi batas ketentuannya. Hal ini ditunjukkan dengan motor terhenti secara otomatis. Beban dikonversi dalam satuan arus listrik pada motor dimana beban berlebih terjadi apabila arus listrik mencapai 30 A. Pada saat motor terhenti, *drum* masih berputar akibat kelembamannya, setelah energinya habis, drum mengalami putar balik. Putaran balik ini terjadi karena muatan yang menempel pada *drum* memiliki berat sehingga memutar *drum* agar muatan berada pada sisi bawah.

Pada saat motor berhenti hingga *drum* berputar balik, poros mengalami beban berlebih sehingga roda gigi poros 4 mengalami penekanan yang diteruskan hingga poros 1. Hal ini menyebabkan tekanan paling besar terdapat pada poros nomor 1. Akibatnya, terjadi tekanan reaksi pada sepasang *bearing* poros 1 ke arah yang berlawanan dengan tekanan pada roda gigi. Tekanan tersebut menyebabkan sepasang *bearing* mengalami keausan yang besar dan tidak homogen. Poros 1 mengalami tekanan paling besar diperkuat dengan adanya getaran *bearing* yang paling tinggi.

Keausan menyebabkan adanya getaran tinggi pada *bearing*. Getaran diukur setiap hari namun tidak dicatat dan tidak ada bukti fisik dari *bearing* yang aus. Tingginya getaran *bearing* sesuai dengan parahnya keausan sepasang *bearing* ditunjukkan oleh *bearing* mesin lain yang mengalami kerusakan sama. Parahnya keausan menyebabkan *roller bearing* dapat dilepas tanpa

menggunakan alat. Keausan tersebut tercapai dalam kurun waktu yang lama.

Sepasang *bearing* yang bergetar menyebabkan poros ikut bergetar. Hal ini mengakibatkan poros berputar pada sumbu yang berubah-ubah sesuai dengan getarannya. Getaran tersebut dapat menimbulkan adanya konsentrasi tegangan pada poros, tepatnya pada daerah yang mengalami perubahan diameter. Hal ini telah diantisipasi dengan adanya 2 *fillet* pada daerah yang mengalami perubahan diameter yaitu *large radius relief groove* dan *large radius undercut*. Poros berputar dengan sumbu yang berubah-ubah dibuktikan dengan timbulnya keausan pada roda gigi. Keausan pada roda gigi terdapat pada ujung kanan, ujung kiri, maupun kedua ujung gigi. Keausan tersebut terjadi akibat ujung-ujung gigi mengalami tekanan dan bergesekan secara bergantian dengan roda gigi pasangannya dari poros yang lain.

Trip terjadi rata-rata 3 kali dalam satu bulan, sehingga dalam 8 tahun, *trip* telah terjadi secara berulang-ulang. Hal ini menyebabkan poros mengalami kelelahan sehingga poros dan *bearing* mengalami penurunan kemampuan dalam meneruskan daya. Sementara itu, penggantian *bearing* yang baru mengharuskan poros untuk meneruskan daya secara penuh sehingga poros yang sudah lelah mengalami patah. Kelelahan yang terjadi pada poros dibuktikan dengan adanya grafik pemakaian arus ketika patah yaitu dibawah batas maksimal.

Poros yang patah menghasilkan sepasang permukaan patahan yaitu permukaan kiri (L) dan permukaan kanan (R). Pada permukaan patahan tersebut terdapat *ratchet marks* yang merupakan pertemuan antara dua *beachmarks*, sementara *beachmarks* merupakan perambatan awal retak. Banyaknya *ratchet marks* timbul akibat adanya banyak awal retak yang menunjukkan adanya konsentrasi tegangan tinggi (Avner, 1974:643). Hal ini dibuktikan dengan terjadinya patah pada daerah yang mengalami perubahan diameter dimana terdapat *fillet*.

Pada permukaan patahan L dan R tidak tampak adanya alur perambatan retak akibat siklik seperti permukaan patah lelah pada

umumnya. Hal ini menunjukkan adanya perambatan retak yang cepat pada sekali siklik. Awal retak-awal retak merambat ke arah pusat poros yang kemudian didorong ke arah radial oleh gaya tangensial akibat putaran poros.

Terdapat daerah yang tidak bersesuaian pada permukaan L dan R yang menunjukkan bahwa sepasang permukaan tersebut saling bergesekan. Hal ini dibuktikan dengan adanya *ratchet marks* permukaan R yang tidak memiliki cerminan pada permukaan R dan adanya perbedaan teksur permukaan yang bersesuaian yaitu permukaan R halus sedangkan pada permukaan L terdapat alur putaran. Bukti lain terjadinya gesekan yaitu adanya alur putar pada permukaan shoulder yang seharusnya halus. Adanya alur putaran pada daerah patah akhir juga merupakan bukti bahwa sepasang permukaan patahan saling bergesekan.

Daerah patah akhir permukaan L dan R saling melengkapi dimana pada permukaan L menjorok keluar, sedangkan pada permukaan R menjorok ke dalam. Hal ini menunjukkan adanya deformasi plastis terlebih dahulu, kemudian terjadi patah ulet. Pada sepasang permukaan patahan terdapat alur putaran dengan arah yang berlawanan dimana pada permukaan R searah jarum jam atau *clockwise* (CW), sementara pada permukaan L berlawanan arah jarum jam atau *counterclockwise* (CCW). Alur putaran pada permukaan patahan menunjukkan atanya gaya puntir ketika terjadi patah (Sunandrio & Sutarjo, 2014:5). Berdasarkan bentuk pemukaan patahan menunjukkan bahwa poros mengalami *torsional fatigue* (ASM Vol. 12, 1987:216).

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, didapatkan kesimpulan adalah sebagai berikut:

- Penyebab patahnya poros yaitu *torsional fatigue*.
- *Torsional fatigue* pada poros terjadi akibat trip yang berulang-ulang. Terjadinya trip memberikan tekanan berlebih pada roda gigi. Akibatnya terjadi tekanan reaksi pada *bearing* pada arah yang berlawanan. Tekanan akibat beban berlebih dan putaran pada *bearing* menyebabkan keausan. Keausan mengakibatkan getaran yang tinggi pada *bearing*. Akibat trip yang berulang dengan berjalannya waktu, kedua hal ini saling mempengaruhi dan menyebabkan poros mengalami kelelahan. Kelelahan poros ini akan menurunkan kemampuannya dalam meneruskan daya. Sementara itu, penggantian *bearing* baru mengharuskan poros meneruskan daya secara penuh sehingga poros yang sudah lelah mengalami patah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis terdapat beberapa saran yaitu:

- Perlu adanya data pendukung statistik sehubungan dengan pengukuran getaran, suhu, beban, dan proses pengoperasian dalam kurun waktu tertentu untuk menyempurnakan analisis ini.
- Setiap data pengukuran yang meliputi getaran, suhu, dan terjadinya *trip* (besar beban yang timbul, waktu yang dibutuhkan *drum* untuk berhenti, lama waktu untuk *restart* kembali) sebaiknya dicatat dan disimpan sebagai bahan untuk menelusuri penyebab kerusakan atau bahkan mencegah terjadinya kerusakan.
- Perlu adanya pengontrolan dalam pemasukan beban muatan drum untuk mengurangi terjadinya *trip*.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

ASM Handbook Committee. 1996. *ASM Metals Handbook Vol. 19: Fatigue and Fracture*. United States of America: ASM International

ASM Handbook Committee. 2002. *ASM Metals Handbook Vol. 11: Failure Analysis and Prevention*. United States of America: ASM International

ASM Handbook Committee. 1987. *ASM Metal Handbook Vol. 12: Fractography*. United States of America: ASM International

Avner, Sydney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill, Inc.

Bakic, Gordana M. dkk. 2007. *New Methodology for Monitoring and Prevention of Rotating Parts Failure*, 35, 195-200

Budynas, Richard G. and Nisbett, J. Keith. 2011. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: Mc-Graw-Hill Companies

Engineering dictionary. 2019. *Limiting Ruling Section*.https://www.engnetglobal.com/tips/glossary.aspx?word=Limiting+Ruling+Section. Diakses 12 Desember 2019

Raut, Sumit P. and Laukik P. Raut. 2014. *A Review of Various Techniques Used for Shaft Failure Analysis*, 2, 159-171

Callister, William D. and David G. Rethwisch. 2009. *Materials Science and Engineering an Introduction*. United States of America: John Willey & Sons, Inc.

Deutschman, Aaron D, Walter J. Michels, and Charles E. Wilson. 1975. *Machine Design*. United Stated of America: Macmillan Publishing Co., Inc.

ETS World. 2018. Artikel. Pengertian Misalignment Pada Poros. htpps://www.etsworlds.id/2018/10/pengertian-misalignment-pada-poros.html. Diakses pada 15 Juli 2020

Febrihantoro, Oky. 2012. Artikel. Misalignment. htpps://www.scribd.com/doc/115580727/Misalignment. Diakses pada 15 Juli 2020

Jatmiko, S. dan S. Jokosisworo. 2012. Analisa Kekuatan Puntir dan Kekuatan Lentur Putar Poros Baja ST 60 Sebagai Aplikasi Perancangan Bahan Poros Baling-Baling Kapal, 5, 42-51

Meyers, Marc and Krishan Chawla. 2009. *Mechanical Behavior Material*. New York: Cambridge University Press

Purwanto, Helmy dan imam Syafaat. 2017. Pengaruh Jenis Elektoda terhadap Sifat Mekanik Hasil Pengelasan SMAW Baja ASTM A36, 13, 27-31

Rao, Singiresu S. 2010. *Mechanical Vibration Fifth Edition*. United Stated of America: Pearson Education Inc.

SKF Group. 2016. *SKF Rolling Bearing*. Sweden: SKF Group

Sunandrio, Hadi dan Sutarjo. 2014. Analisis Kegagalan Shaft Pompa Submersible pada Unit Pengeboran Minyak Bumi, 14, 37-45

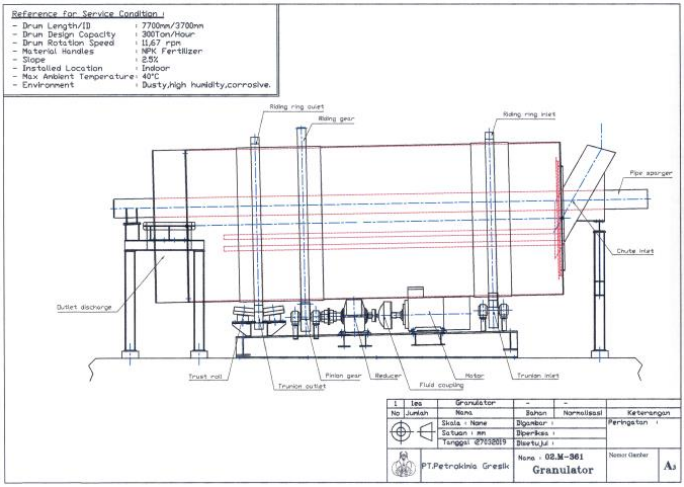
Triantafyllidis, Georgio K dkk. 2009. *Fracture Characteristics of Torsion-Bending Fatigue and Impact Fatigue Failure of Two Steel Pins in a Crawler Excavator*, 9, 23-27

Xiaolei, Xu and Yu Zhiwei. 2008. *Failure Analysis Of A Locomotive Turbocharger Main Shaft*, 16, 495-502

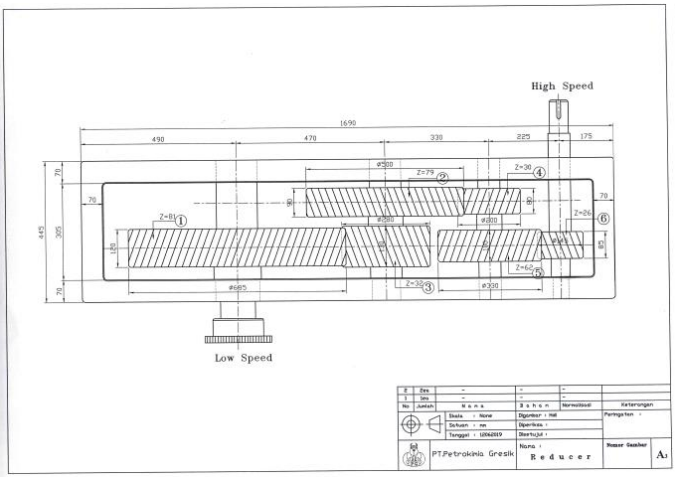
LAMPIRAN

1. Grafik pemakaian arus motor 14 jam sebelum poros patah

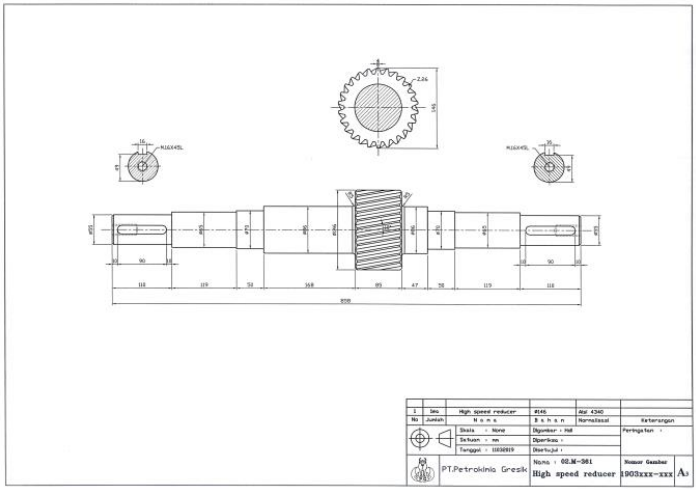
2. Gambar susunan *rotary drum granulator*



3. Gambar susunan dalam gearbox



4. Dimensi poros yang patah



5. Sertifikat Poros

MESSRS.
PT LOGAMANDA PERWIRA
SHIPPER'S NAME
MITSUBISHI STEEL MFG.CO.,LTD.
CONTRACT NO.
K225653

COMMODITY
✓ AISI4340 150.00 MM
CONDITION
HOT ROLLED AND ANNEALED

MITSUBISHI STEEL MURORAN INC.
12,NAKAWACHI,MURORAN CITY,HOKKAIDO JAPAN

CERTIFICATE NO. 0808-017
DATE 08 AUG., 2014

CHEMICAL COMPOSITION (%)

ITEMS	C X100	SI X100	MN X100	P X1000	S X1000	NI X100	CR X100	MO X100	CU X100	HEAT NO.	PIE-CES	MASS (KG)	BUNDLE NO.
SPEC.	38 - 43	15 - 35	60 - 80	MAX. 30	MAX. 40	165 - 200	70 - 90	20 - 30	MAX. 35	E37619	13	9960	0008-0014
E37619 0008-0014	40	24	77	17	8	174	86	24	1				

MECHANICAL PROPERTIES

ITEMS	YIELD	TENSILE STRENGTH	ELON-GATION %	REDUCTION OF AREA %	HARDNESS	IMPACT VALUE	BEND TEST 180°	SAMPLING CONDITION MATERIAL	HEAT TREATMENT (°C)
SPEC.									
E37619 0008-0014									

ITEMS	HARDENABILITY (END QUENCHING METHOD)	CEQ.	DI
SPEC.			
E37619 0008-0014			

ITEMS	NON-METALLIC INCLUSION	GRAIN SIZE	MACRO STREAK FLAW	MACRO STRUCTURE	BODY HARDNESS HBW	HARDNESS	REMARKS
SPEC.					MAX. 255		
E37619 0008-0014					223		

IT IS HEREWITH CERTIFIED THAT THE ABOVE STEELS ARE SATISFACTORY IN QUALITY AND QUANTITY IN COMPLIANCE WITH THE REQUIREMENTS SPECIFIED IN THE CONTRACT.

T. Uchida
MANAGER, QUALITY ASSURANCE SECTION MURORAN WORKS.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS

Nanindya Vidianti Alvionita merupakan nama lengkap penulis. Penulis dilahikan di Kota Gresik pada 20 Agustus 1997 dan merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan di TK Muslimat NU 9 Sekar Kedaton, SD Negeri 2 Sidokumpul, SMP Negeri 1 Gresik, dan SMA Negeri 1 Gresik. Setelah lulus dari SMA Negeri 1 Gresik, penulis melanjutkan kuliah di S1 Departemen Teknik Mesin ITS dan mengambil bidang metalurgi.

Penulis aktif dalam organisasi di dalam kampus Teknik Mesin ITS, pernah menjabat sebagai Staf Divisi Internal Mesin ITS Autosport periode 2016-2017 dan Kepala Divisi Internal Mesin ITS Autosport periode 2017-2018. Tidak hanya organisasi, penulis juga bergabung kepanitiaan yaitu pernah menjadi *chief* konseptor acara KMHE 2017. Penulis dapat dihubungi melalui email: nanindyaviedi@gmail.com.