



TUGAS AKHIR - TL141584

ANALISA KEGAGALAN CONNECTING ROD TIPE MAHLE PADA AUXILIARY ENGINE MAN D 2840 LE PT MERATUS LINE SURABAYA

Bayu Fahrudin
NRP 2712 100 095

Dosen Pembimbing :

Mas Irfan P. Hidayat ,S.T., M.Sc., Ph.D.
Haniffudin Nurdiansah, ST., M.T

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL141584

FAILURE ANALYSIS OF CONNECTING ROD MAHLE TYPE IN AUXILIARY ENGINE MAN D 2840 LE PT MERATUS LINE SURABAYA

Bayu Fahrudin
NRP 2712 100 095

Supervisor :

Mas Irfan P. Hidayat ,S.T., M.Sc., Ph.D.
Haniffudin Nurdiansah, ST., M.T

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**ANALISA KEGAGALAN CONNECTING ROD TIPE
MAHLE PADA AUXILIARY ENGINE MAN D2840 LE PT.
MERATUS LINE SURABAYA**

TUGAS AKHIR

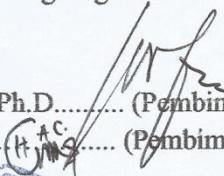
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Korosi Dan Analisa Kegagalan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

BAYU FAHRUDIN

NRP. 2712100095

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. Hidayat, ST. M.Sc. Ph.D..... (Pembimbing 1)
2. Haniffudin Nurdiansah, ST., MT. ..... (Pembimbing 2)



(Halaman Ini Sengaja Dikосongkan)

**ANALISIS KEGAGALAN CONNECTING ROD TIPE
MAHLE PADA AUXILIARY ENGINE MAN D 2840 LE PT.
MERATUS LINE SURABAYA**

Nama : Bayu Fahrudin
Nrp : 2712100095
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc, Ph.D
Co-Pembimbing : Haniffudin Nurdiansah, ST., MT

ABSTRAK

Connecting Rod adalah bagian penting dalam system kerja mesin. Namun sering terjadi kegagalan yang disebabkan berbagai macam hal, sehingga kinerja mesin tidak bisa berjalan maksimal. Dalam penelitian ini berisi tentang analisa kegagalan dari *connecting rod* tipe Mahle pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE yang telah menjadi masalah utama pada PT. Meratus Line Surabaya. Kegagalan yang terjadi berupa patahnya *connecting rod* yang disebabkan karena patah getas *transgranular*. Hal ini didukung oleh hasil pengujian OES, SEM, metalografi, Hardness, dan visual. Selain patah getas, penyebab kegagalan pada *connecting rod* ini adalah patah lelah, hal ini dikarenakan tegangan yang diterima material adalah tegangan yang siklik dan terus menerus. Diharapkan hasil pada tugas akhir ini bisa untuk acuan ilmu berikutnya.

Kata Kunci: *connecting rod*, *transgranular*, *oes*, *sem*, *hardness*, *metalografi*, *fatigue*

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

**FAILURE ANALYSIS OF CONNECTING ROD MAHLE
TYPE IN AUXILIARY ENGINE MAN D 2840 LE PT.
MERATUS LINE SURABAYA**

Name : Bayu Fahrudin
Nrp : 2712100095
Department : Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS
Supervisor : Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc, Ph.D
Co-Supervisor : Haniffudin Nurdiansah, ST., MT

ABSTRACK

Connecting Rod is one of the most important part on engine system. However there are many failure caused by several things, so the performance of machine could not run optimally. In this thesis contains analysis of the failure of a connecting rod-type Mahle on auxiliary engine MAN D 2840 LE which has become a major problem in PT. Meratus Line Surabaya. Failures that occur in the form of connecting rod fracture due to brittle fracture transgranular. This is supported by the results of testing of OES, SEM, metallographic, hardness, and visual. Another problem that caused the failure of the connecting rod is connecting rod receive continous stress, that make the material fatigue. Expected results in this thesis can for subsequent reference science

Keyword: connecting rod, transgranular, oes, sem, hardness, metalograph, fatigue

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah atas limpahan rahmat dan karunia Allah SWT, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun Laporan Tugas Akhir yang berjudul : **Analisa Kegagalan Connecting Rod Tipe MAHLE pada Auxiliary Engine MAN D 2840 LE PT Meratus Line. Surabaya.**

Pada kesempatan kali ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis Bapak Siswanto dan Ibu Sarmi atas semua dukungan moril dan materil serta do'a yang selalu dicurahkan.
2. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat S.T., M.Sc., Ph.D. dan Bapak Haniffudin Nurdiansah, ST., MT selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
4. Temen –temen MT 14 dan semua MT yang selalu member motivasi.
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Temen-temen d'Mapan yang selalu menemani.
7. PT Meratus Line yang telah bersedia memberikan topik tugas akhir kepada penulis.

Penyusun menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan ini. Besar harapan penyusun akan saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat selalu bermanfaat. Amin.

Surabaya, Juli 2016

Penyusun

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
TITLE	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Mesin Diesel	5
2.2 Connecting rod	9
2.3 Mekanisme Silinder Crank	11
2.4 Perhitungan gaya pada connecting rod	12
2.5 Besi cor	13
2.5.1 Besi Cor Putih	13
2.5.2 Besi Cor Kelabu	14
2.5.3 Besi Cor Nodular	15
2.5.4 Besi Cor Mampu Tempa	16
2.6 Diagram Fasa dan komposisi kimia dari white cast iron	17
2.7 Jenis Patahan	19
2.7.1 Perpatahan Ulet	21
2.7.2 Perpatahan Getas	24
2.7.3 Perpatahan Fatik	27
2.7.4 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah	28

2.7.5 Karakteristik Patahan.....	30
2.7.6 Perpatahan Dekosif	32
2.8 Penelitian Sebelumnya	33
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	37
3.1 Diagram AlirPenelitian.....	37
3.2 Metode Penelitian.....	38
3.3 Material yang digunakan	38
3.4 Peralatan dan Bahan	40
3.4.1 Peralatan.....	40
3.4.2 Bahan.....	40
3.5 Tahapan Penelitian	40
3.5.1 Pengambilan dan Persiapan Spesimen.....	40
3.5.2 Preparasi Spesimen.....	40
3.5.3 Pengamatan Makroskopik.....	41
3.5.4 Pengamatan Mikroskopik	41
3.5.5 Pengujian Komposisi	42
3.5.6 Pengujian Metalografi	43
3.5.7 Pengujian Kekerasan Brinell.....	44
3.6 Rancangan Penelitian	45
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Analisa Data.....	47
4.1.1 Record Komponen.....	47
4.1.2 Hasil Uji OES.....	48
4.1.3 Hasil Pengujian Kekerasan Vickers.....	49
4.1.4 Hasil Pengujian Metalografi	52
4.1.5 Pengamatan Visual	55
4.1.6 Hasil Pengujian SEM permukaan patahan.....	58
4.2 Pembahasan	60
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran.....	63
DAFTAR PUSTAKA	65
BIODATA PENULIS	67
LAMPIRAN	68

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Auxiliary Engine MAN D 2840 LE.....	7
Gambar 2.2 Skema Cara Kerja 4 Langkah (Harrington, 2008)	7
Gambar 2.3 <i>Connecting rod</i> pada <i>auxiliary engine</i> MAN D2840 LE	10
Gambar 2.4 Mekanisme silinder crank.....	11
Gambar 2.5 Struktur Mikro Besi Cor Putih (White Cast Iron).....	14
Gambar 2.6 Struktur Mikro Besi Cor Kelabu (<i>Gray Cast Iron</i>)	15
Gambar 2.7 Struktur Mikro Besi Cor Nodular (<i>Nodular Cast Iron</i>).....	16
Gambar 2.8 Struktur Mikro Besi Mampu Tempa (<i>Melleable Cast Iron</i>)	16
Gambar 2.9 Diagram fasa Fe-Fe ₃ C dari cast iron(William D.Callister.2007).....	17
Gambar 2.10 Struktur mikro dari cast iron(William D.Callister.2007).....	18
Gambar 2.11 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan(Callister,2007) ...	20
Gambar 2.12 a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi <i>necking</i> , (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007).....	21
Gambar 2.13 Tahap patahan cup dan cone (a) awal <i>necking</i> ,(b) terbentuknya <i>cavity</i> kecil, (c) pengumpulan <i>cavity</i> hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan(Callister,2007).....	22

Gambar 2.14	a) patah ulet (<i>cup and cone</i>) pada aluminium.(b)patah getas pada <i>mild steel</i> (Wulpi,1999).....	23
Gambar 2.15	(a) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik, patahan hasil beban tarik <i>unioxial</i> , 3300x.(b) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister,2007).....	24
Gambar 2.16	Permukaan patahan Al-4.2 Cu Alloy setelah mengalami pengujian tensile (a) perbesaran 10x (b)perbesaran 500x.....	24
Gambar 2.17	(a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karateristik patah getas. (b) Foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan. (Callister,2007).....	25
Gambar 2.18	(a) skema perambatan retak yang melewati butir (<i>transgranular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular (Callister,2007).....	26
Gambar 2.19	(a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (<i>intergranular</i>) (b) hasil SEM dari patah secara <i>intergranular</i> (Callister,2007).....	26
Gambar 2.20	Beach mark pada permukaan patahan yang terlihat jelas dari sebuah shaft	27
Gambar 2.21	Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 <i>Fatigue and Fracture</i> ,2002)	28
Gambar 2.22	Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, Shin-ichi,1992).....	29
Gambar 2.23	Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan besar (e) beban tekan nol (f) beban tekan kecil (Callister,2007).....	30

Gambar 2.24 Foto SEM yang menunjukkan <i>Beachmarks</i> dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005)	31
Gambar 2.25 Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular (Colangelo, 1989).....	32
Gambar 2.26 Perpatahan decohesive yang muncul pada batas butir C-Mn Alloy	33
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	37
Gambar 3.2 Connecting Rod yang mengalami Kegagalan.....	39
Gambar 3.3 Kamera untuk melihat penampang makroskopis.....	41
Gambar 3.4 Mesin SEM dan Skema Kerja Mesin SEM.	42
Gambar 3.5 Mesin uji komposisi.....	43
Gambar 3.6 Mikroskop Optik Olympus BX51M-RF	44
Gambar 3.7 Mesin Uji Kekerasan.....	44
Gambar 4.1 <i>Connecting Rod</i> Mahle MAN D 2840 LE.....	48
Gambar 4.2 Indentasi bagian yang dekat dengan patahan	50
Gambar 4.3 indentasi bagian yang jauh dengan patahan	48
Gambar 4.4 Grafik distribusi kekerasan pada <i>connecting rod</i>	50
Gambar 4.5 Hasil metalografi dari <i>connecting rod</i> . Perbesaran 10x (etsa: Nital).....	52
Gambar 4.6 Hasil metalografi dari <i>connecting rod</i> . Perbesaran 20x (etsa: Nital).....	52
Gambar 4.7 Hasil Uji Metalografi <i>Connecting Rod</i> perbesaran 50x.....	53
Gambar 4.8 Penampang patahan <i>Connecting Rod</i>	55
Gambar 4.9 Daerah <i>initial crack pada</i> <i>connecting rod</i>	55
Gambar 4.10 Daerah perambatan retak.....	56
Gambar 4.11 Daerah Patah akhir.....	57
Gambar 4.12 Foto SEM bagian tengah permukaan patahan <i>connecting rod</i> tipe MAHLE (perbesaran 500x).....	58

Gambar 4.13	Hasil SEM permukaan patahan (perbesaran 2000x).....	59
Gambar 4.14	Foto SEM bagian ujung permukaan patahan connecting rod tipe MAHLE (perbesaran 500x).....	59

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Data Teknik <i>Auxiliary Engine</i> MAN D 2840 LE	6
Tabel 2.2 Komposisi Kimia cast iron(ASM Metals Vol.9).....	19
Tabel 3.1 Data Penunjang <i>Auxiliary engine</i>	39
Tabel 3.2 Rancangan penelitian spesimen	45
Tabel 4.1 Spesifikasi Dimensi <i>Connecting rod</i>	47
Tabel 4.2 Data Hasil Uji Komposisi	49
Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Kekerasan	51
Tabel 4.4 Jenis MAHLE cast iron yang digunakan PT. MERATUS beserta spesifikasinya	54

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Ilmu material dan metalurgi sebagai suatu ilmu pengetahuan muncul dan berkembang untuk memenuhi kebutuhan tenaga ahli dan terampil dalam mengelola sistem produksi atau sistem industri, yang melibatkan komponen-komponen manusia, material, dan mesin/fasilitas produksi. Tidak dapat dipungkiri lagi di dalam suatu industri pasti muncul fenomena – fenomena kegagalan dari suatu material seperti timbulnya korosi, munculnya crack pada komponen – komponen mesin, dan sebagainya sehingga menyebabkan mesin tidak dapat beroperasi secara optimal. Salah satu cabang dari ilmu material dan metalurgi yang berperan untuk memecahkan masalah tersebut adalah analisis kegagalan material (*Failure Analysis*).

Dalam industri perkapalan, faktor keamanan sangatlah diutamakan. Kegagalan suatu komponen akan menyebabkan kerugian pada perusahaan. PT. Meratus Line sebagai perusahaan yang memiliki banyak armada kapal tentulah juga memiliki workshop sebagai tempat perbaikan untuk kapal ketika mengalami kerusakan. Dalam mesin kapal banyak sekali dijumpai kegagalan – kegagalan dari suatu komponen mesin kapal. Masalah yang sering muncul diantaranya adalah kegagalan pada *connecting rod*, baik mengalami bengkok maupun patah. Banyak faktor yang mempengaruhi terjadinya kegagalan pada *connecting rod*, seperti korosi, ketidaktepatan pemilihan material, kondisi lingkungan, dan kesalahan pemasangan.

Pada juli 2015 kapal MAN D2840 LE mengalami kerusakan mesin, setelah dilakukan pengecekan diketahui bahwa salah satu *connecting rod* dari mesin itu mengalami kerusakan, yaitu patah menjadi dua bagian. PT. MERATUS juga memiliki masalah mengenai jenis *connecting rod* apa yang harus dipakai untuk mengganti *connecting rod* tersebut. Dari informasi



kegagalan dan pengumpulan data mengenai *hal tersebut*, kemudian dianalisa kegagalan material. Metode analisa yang dilakukan menggunakan metode makro dan mikro.

I.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam analisa kegagalan pada *connecting rod* tipe MAHLE ini adalah :

1. Faktor apa yang menyebabkan kegagalan pada *connecting rod* tipe MAHLE yang dipasang pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE secara mekanik?
2. Bagaimanakah mekanisme kegagalan pada *connecting rod* tipe MAHLE yang dipasang pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE secara mekanik?

I.3. Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Material komponen adalah *connecting rod* tipe MAHLE yang dipasang pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE dalam keadaan gagal.
2. Desain dari *connecting rod* memenuhi standar yang telah ditentukan.

I.4. Tujuan Penelitian

Tujuan analisa kegagalan pada *connecting rod* tipe MAHLE yang dipasang pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE adalah :

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada *connecting rod* tipe MAHLE yang dipasang pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE.



2. Menganalisa mekanisme kegagalan pada *connecting rod* tipe MAHLE yang dipasang pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE.

I.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan penanganan bila terjadi kegagalan dikemudian hari dan dasar pengembangan pada ilmu berikutnya.



(halaman ini sengaja dkosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mesin Diesel

Mesin diesel merupakan *Main Propulsion System* yang sering diaplikasikan pada kapal tipe apapun karena keandalan dan range daya yang dihasilkannya. Prinsip dari mesin diesel adalah mengubah energy kalor menjadi energy mekanik. Mesin diesel menggunakan beberapa silinder yang di dalamnya terdapat torak yang bergerak translasi bolak balik (*reciprocating engine*). Di dalam silinder itulah terjadi pembakaran antara bahan bakar dan oksigen. Proses pembakaran tersebut mampu menggerakkan torak yang dihubungkan dengan poros engkol oleh batang penghubung (*connecting rod*). Gerak translasi torak tadi menyebabkan gerak rotasi pada poros engkol.

Mesin diesel MAHLE tipe D2840 LE ini sendiri memiliki 10 silinder di dalamnya. Sistem *turbocharging* yang digunakan adalah dengan menggunakan udara pendingin sedangkan untuk pendingin mesin menggunakan sirkulasi dari air dengan menambahkan *rotary pump* dan *front end combination radiator*. Sistem injeksi yakni memakai sistem *bosch inline injection pump* dengan menggunakan aktuator elektromagnetik. Untuk control mesin dari mesin ini menggunakan variasi tipe GAC kontrol sesuai dengan permintaan. Data Teknik Auxiliary engine ini dapat dilihat pada table 2.1



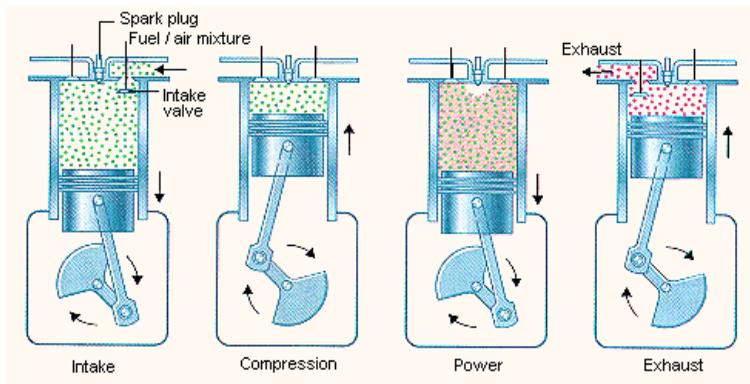
Tabel 2.1 Data Teknik *Auxiliary Engine* MAN D 2840 LE

Description	Austenitic cast iron for ring carriers			Cast iron with spheroidal graphite for pistons and piston skirts
	M-H (lamellar)	M-K (spherulitic)	M-S70 (EN GJS 700-2)	
Alloying elements (Percent by weight)	C	2.4–2.8	2.4–2.8	3.5–4.1
	Si	1.8–2.4	2.9–3.1	2.0–2.4
	Mn	1.0–1.4	0.6–0.8	0.3–0.5
	Ni	13.5–17.0	19.5–20.5	0.6–0.8
	Cr	1.0–1.6	0.9–1.1	–
	Cu	5.0–7.0		<0.1
	Mo			
	Mg	0.03–0.05	0.04–0.06	
Brinell hardness HBW 30		120–150	140–180	240–300
Tensile strength R_m [MPa]	20°C	190	380	700
	100°C	170		640
	200°C	160		600
	300°C	160		590
	400°C	150		530
Yield strength $R_{p0.2}$ [MPa]	20°C	150	210	420
	100°C	150		390
	200°C	140		360
	300°C	140		350
	400°C	130		340
Elongation at fracture A_5 [%]	20°C	2	8	2
Fatigue strength σ_{bw} [MPa]	20°C	150		250
Young's modulus E [MPa]	20°C	100,000	120,000	177,000
	200°C			171,000
Thermal conductivity λ [W/mK]	20°C	32	13	27
Thermal expansion α [10^{-6} m/mK]	20–200°C	18	18	12
Density ρ [g/cm ³]	20°C	7.45	7.4	7.2



Gambar 2.1 Auxiliary Engine MAN D 2840 LE (MAN, 2012)

Mesin diesel ini memiliki mode operasi yang menggunakan mesin diesel 4 tak dengan injeksi bahan bakar secara langsung. Cara kerja mesin diesel 4 tak terdiri dari 4 langkah kerja yakni langkah hisap / *intake*, langkah kompresi / *compression*, langkah kerja / *work*, langkah buang / *exhaust*. Skema cara kerja 4 langkah dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Skema Cara Kerja 4 Langkah (Harrington, 2008)



1. Langkah Hisap/*Intake*

Pada proses ini piston bergerak dari titik mati atas (TMA) menuju titik mati bawah (TMB) dan katup inlet terbuka sedang katup buang tertutup. Udara dari lingkungan dihisap sebanyak luasan piston dikali dengan langkah piston (*stroke*). Pada mesin diesel hanya udara saja yang dihisap pada ruang bakar, sedangkan pada mesin otto udara telah bercampur dengan bahan bakar.

2. Langkah kompresi/*Compression*

Pada proses ini udara yang berada pada ruang bakar dikompresikan dan piston bergerak dari titik mati bawah (TMB) menuju titik mati atas (TMA) dan kedua katup inlet serta katup buang tertutup. Udara yang termampatkan tersebut mengalami peningkatan tekanan dan suhu yang sangat tinggi seiring pengurangan volume di ruang bakar akibat dari gerakan piston tersebut. Mesin diesel memiliki karakteristik rasio kompresi yang tinggi karena proses pembakaran tidak diawali dengan *ignition* seperti halnya pada mesin otto, maka untuk mencapai *flash point* bahan bakar yang diinjeksikan diperlukan suhu udara yang sangat tinggi.

3. Langkah kerja/*work*

Pada proses ini piston bergerak dari titik mati atas (TMA) menuju titik mati bawah (TMB) akibat dari ledakan bahan bakar yang terjadi pada ruang bakar dan kedua katup inlet serta katup buang tertutup. Proses pembakaran terjadi akibat dari bahan bakar yang diinjeksikan pada ruang bakar sesaat sebelum piston mencapai titik mati atas (TMA) sehingga piston memiliki tenaga yang mendorongnya kebawah menuju titik mato bawah (TMB).



4. Langkah buang/*exhaust*

Pada proses ini gas akibat pembakaran yang terjadi dikeluarkan dari ruang bakar. Mekanisme yang terjadi adalah piston bergerak dari titik mati bawah (TMB) menuju titik mati atas (TMA) serta katup inlet tertutup sedang katup buang terbuka.

Dari langkah-langkah yang terjadi seperti pada penjelasan diatas maka didapatkanlah siklus kerja mesin diesel. Ledakan yang terjadi saat langkah kerja menyebabkan piston dapat melakukan gerak translasi yang nantinya diubah menjadi gerak rotasi oleh *crankshaft*/poros engkol dan kemudian diteruskan ke *flywheel* sebagai *balancer component* dan juga penyimpan momen dari putaran *crankshaft*. Mengacu pada kemampuan *flywheel* untuk menyimpan energi kinetik dari proses rotasi poros engkol, ketidakstabilan putaran *crankshaft* hampir selalu terjadi. Hal ini dikarenakan kemampuan *crankshaft* untuk merubah gerak translasi dari sebuah piston menjadi gerak rotasi poros juga mengalami akselerasi sewaktu proses pembakaran dalam silinder liner terjadi

2.2 Connecting Rod

Connecting rod adalah suatu komponen utama mesin yang berfungsi untuk menghubungkan piston ke *crankshaft* dan selanjutnya menerima tenaga dari piston yang diperoleh dari pembakaran dan meneruskannya ke *crankshaft*. Bagian ujung *connecting rod* yang berhubungan dengan pin piston disebut *small end*. Sedangkan yang berhubungan dengan poros engkol disebut *big end*. Poros engkol berputar pada kecepatan tinggi di dalam *big end*, dan mengakibatkan temperatur menjadi naik. Untuk menghindari hal tersebut, maka metal dipasang dalam *big end*. Metal ini dilumasi dengan oli dan sebagian dari oli ini dipercikkan dari lubang oli ke bagian dalam piston untuk mendinginkan piston atau torak.



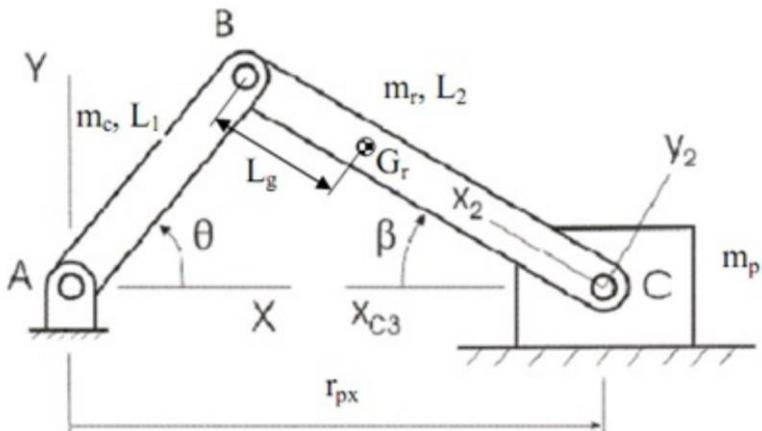
Gambar 2.3 *Connecting rod* pada *Auxiliary Engine* MAN D 2840 LE

Tugas *connecting rod* sangatlah berat, selain mendapatkan tekanan yang berasal dari piston, *connecting rod* juga mendapatkan pembebanan regangan pada saat langkah hisap dan tekukan pada saat merubah gerak lurus menjadi gerak putar. Fungsi dari *connecting rod* adalah untuk menghubungkan piston ke poros engkol dan selanjutnya menerima tenaga dari piston yang diperoleh dari pembakaran dan meneruskannya ke *crankshaft*.



2.3 Mekanisme Silinder crank

Saat mekanisme *slider crank* bekerja dengan kecepatan tinggi, komponen didalamnya akan mengalami deformasi. Deformasi plastis pada komponen-komponen tersebut dapat mengakibatkan kegagalan atau kerusakan saat mekanisme *slider crank* bekerja, dengan mengasumsikan *crankshaft*, *connecting rod*, dan piston sebagai benda tegar. Benda tegar (*rigid body*) adalah kondisi dimana deformasi yang terjadi pada komponen-komponen mekanisme *slider crank* diabaikan. Analisa *connecting rod* pada Mekanisme *single-cylinder* secara analitik, di analisa dengan Gambar 2.4 merupakan gambar sederhana dari sebuah mekanisme *slider crank*.



Gambar 2.4 Mekanisme Silinder Crank

Keterangan:

- L_1 = Panjang crankshaft
- L_2 = Panjang connecting rod
- M_c = massa crankshaft
- M_r = massa connecting rod
- M_p = massa piston



G_r = Pusat massa connecting rod

L_g = Jarak G_r ke big end

2.4 Perhitungan gaya pada connecting rod

Menurut data perusahaan, gaya kompresi piston yang terjadi adalah sebesar 87500 N sedangkan daya yang dihasilkan adalah 274 kW, berdasarkan daya yang dihasilkan dapat dihitung besar gaya tekan *connecting rod* terhadap *crankshaft* dengan perhitungan sebagai berikut.

Karena pada Auxiliary Engine MAN D 2840 LE terdapat 10 ruang pembakaran maka besar daya yang dihasilkan tiap ruang adalah sebesar :

$$\begin{aligned} \text{Daya tiap ruang pembakaran} &= \frac{\text{Daya yang dihasilkan}}{10} \quad (2.1) \\ &= \frac{274000 \text{ watt}}{10} \\ &= 27400 \text{ watt} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Besarnya Tegangan } (\sigma) &= \frac{F}{A} \quad (2.2) \\ &= \frac{87500}{660} \\ &= 132,57 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

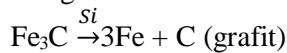
2.5 Besi Cor

Besi cor merupakan paduan besi dan karbon yang mengandung silikon, mangan, fosfor dan belerang. Unsur karbon dalam besi cor dapat berupa sementit, karbon bebas atau grafit. Besi cor memiliki keuletan yang relatif rendah sehingga tidak dapat ditempa, diroll atau didrawing. Penggunaan besi cor cukup luas karena besi cor memiliki sifat khusus seperti, mudah dituang pada saat kondisi cair sehingga banyak digunakan khususnya di industri pengecoran logam. Besi cor pada dasarnya merupakan



paduan eutektik dari besi dan karbon. Dengan demikian temperature lelehnya relative rendah, sekitar 1200° celcius. Temperature leleh yang rendah sangat menguntungkan, karena mudah dicairkan, sehingga pemakaian bahan bakar atau energy lebih hemat dan murah. Selain itu dapur peleburan dapat di bangun dengan lebih sederhana.

Karena mengandung unsur silicon sebesar 1 – 3 % menyebabkan kekuatan besi cor meningkat melalui penguatan fasa ferit dan juga menurunkan temperatur leleh eutektik. Selain itu, adanya silicon ini menyebabkan terjadinya dekomposisi karbida menjadi besi dan grafit melalui reaksi :

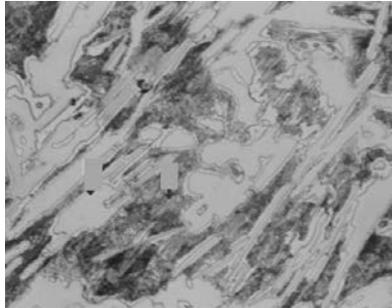


Proses ini diakibatkan oleh sifat Fe_3C yang metastabil. Proses ini sering disebut grafitisasi karena menghasilkan grafit dalam besi cor.

Berdasarkan bentuk grafitnya, besi cor diklasifikasikan menjadi 4 jenis, yakni besi cor putih (white cast iron), besi cor kelabu (gray cast iron), besi cor nodular (nodular cast iron) dan besi cor mampu tempa (malleable cast iron).

2.5.1. Besi Cor Putih (White Cast Iron)

Besi cor putih didapat dengan cara pendinginan cepat. Pada akhir pendinginan tersebut akan terbentuk fasa sementit dan pearlit, Fe_3C yang metastabil dan karbon tidak memiliki kesempatan untuk membentuk grafit. Karena sementit adalah struktur yang sangat keras dan getas, maka sifat besi cor putih juga keras, tahan aus dan sulit dimachining.

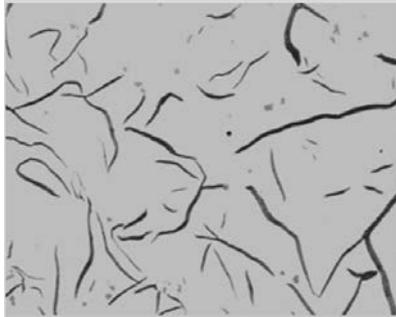


Gambar 2.5. Struktur Mikro Besi Cor Putih (White Cast Iron)

Karena memiliki kekerasan dan ketahanan aus yang tinggi, besi cor putih sering diaplikasikan dalam komponen gerinda, kelengkapan penghancur, komponen furnace dan lain – lain.

2.5.2. Besi Cor Kelabu (Gray Cast Iron)

Besi cor kelabu memiliki kadar karbon yang lebih tinggi dibandingkan besi cor putih. Karena kadar karbon yang tinggi tersebut menyebabkan pada proses pendinginan karbon memiliki kesempatan untuk berubah menjadi grafit (grafitisasi). Hal ini juga didukung dengan kadar silicon yang cukup tinggi. Adanya grafit menyebabkan keuletan bahan menjadi rendah, sehingga sifat yang dimiliki oleh besi cor kelabu adalah keuletan yang rendah (nil ductility) dan kekuatan tarik yang tidak terlalu tinggi.

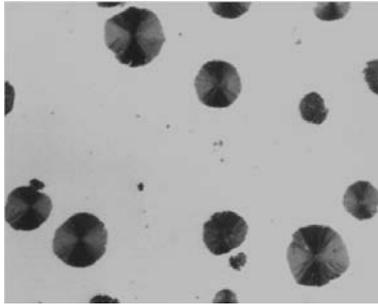


Gambar 2.6 Struktur Mikro Besi Cor Kelabu (*Gray Cast Iron*)

Dengan sifat yang dimilikinya, besi tuang kelabu sering digunakan sebagai crankcase, cylinder head, machine tool bed dan lain – lain.

2.5.3. Besi Cor Nodular (Nodular Cast Iron)

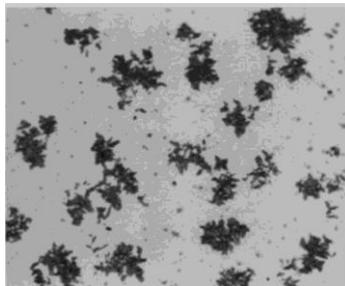
Besi cor nodular adalah modifikasi dari besi cor kelabu. Material ini didapatkan dengan cara menambahkan sedikit inoculating agent pada besi tuang kelabu, seperti magnesium atau kalsium silikat sehingga menyebabkan grafit yang awalnya berbentuk flake menjadi bentuk nodular. Karena grafitnya berbentuk spheroid/bola – bola kecil mengakibatkan kekuatan dan keuletannya menjadi naik. Sehingga besi cor nodular memiliki sifat kekuatan dan keuletan yang baik dan banyak diaplikasikan sebagai komponen otomotif seperti poros engkol, kepala silinder, pipa dan lain – lain.



Gambar 2.7. Struktur Mikro Besi Cor Nodular (*Nodular Cast Iron*)

2.5.4. Besi Cor Mampu Tempa (Malleable Cast Iron)

Besi cor mampu tempa dibuat dengan proses annealing dari besi cor putih. Dengan perlakuan tersebut, fasa sementit akan terdekomposisi menjadi besi dan grafit. Grafit yang terbentuk tidak berupa serpih atau bulat, melainkan berbentuk gumpalan dengan ujung yang tajam.



Gambar 2.8. Struktur Mikro Besi Mampu Tempa (*Malleable Cast Iron*)

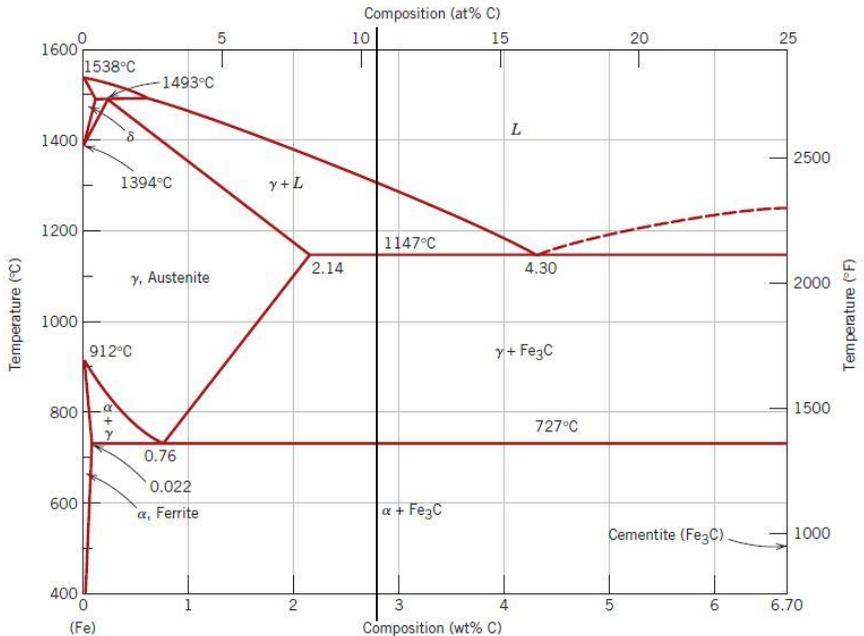
Akibat proses annealing, sifat mekanik bahan pun ikut berubah. Besi cor ini memiliki keuletan yang tinggi dan mudah ditempa, hampir mirip dengan baja. Oleh karenanya, besi cor ini



sering diaplikasikan untuk perkakas dan alat – alat berat seperti peralatan kereta api dan lain – lain.

2.6 Diagram Fasa dan komposisi kimia dari *white cast iron*

Cast iron adalah paduan besi dan karbon dengan kadar karbon lebih dari 2%, pada gambar 2.9 berikut adalah diagram fasa Fe-Fe₃C dari cast iron.

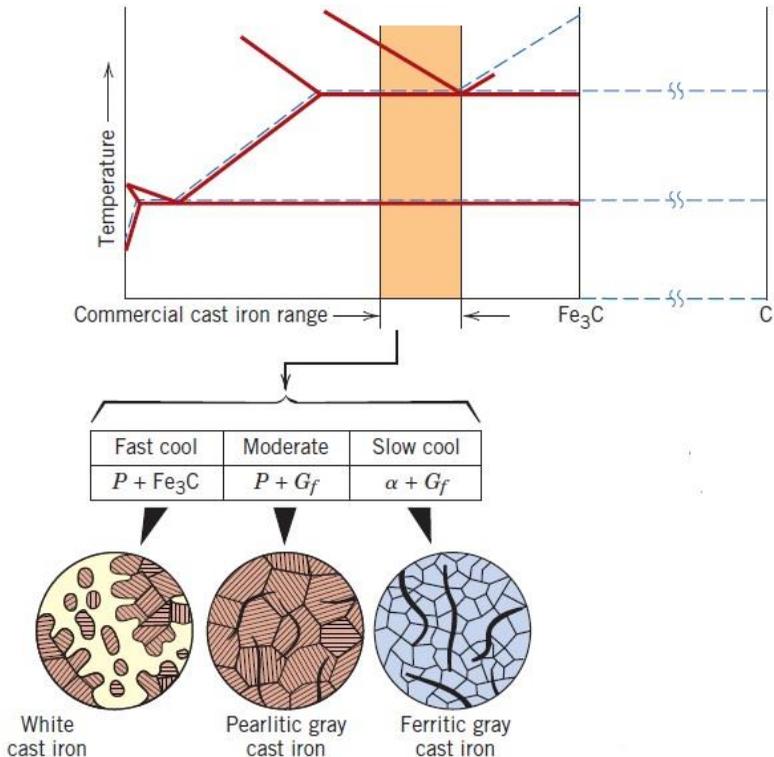


Gambar 2.9 Diagram fasa Fe-Fe₃C dari cast iron (William D. Callister, 2007)

Kandungan karbon pada *connecting rod* ini adalah sekitar 2,9%, dimana tahapan pembekuannya dimulai dari liquid kemudian menjadi Austenite dan liquid, pada temperature 1100° C struktur mikronya berupa austenite dan mulai terbentuk sementit, kemudian menjadi Perlit dan sementit, gambar struktur mikronya ditunjukkan gambar 2.10. dimana pada gambar ini



diperlihatkan bahwa jika pendinginan cepat dilakukan maka akan terbentuk *white cast iron*, dan jika pendinginan yang diatur ataupun pendinginan lambat akan menghasilkan *gray cast iron*. Hal ini membuktikan bahwa *white cast iron* adalah tipe besi tuang yang didinginkan secara cepat.



Gambar 2.10 Struktur mikro dari cast iron (William D. Callister, 2007)

Menurut ASM Metals Handbook Volume 9 tentang metalografi dan mikro struktur, komposisi kimia pada *cast iron* adalah sebagai berikut:



Tabel 2.2 Komposisi Kimia Cast Iron(ASM Metals Vol.9)

Type of iron	Composition, %			
	C	Si	Mn	P
Gray (FG)	2.5–4.0	1.0–3.0	0.2–1.0	0.002–1.0
Compacted graphite (CG)	2.5–4.0	1.0–3.0	0.2–1.0	0.01–0.1
Ductile (SG)	3.0–4.0	1.8–2.8	0.1–1.0	0.01–0.1
White	1.8–3.6	0.5–1.9	0.25–0.8	0.06–0.2
Malleable (TG)	2.2–2.9	0.9–1.9	0.15–1.2	0.02–0.2

Pada Tabel 2.2 terlihat bahwa komposisi dari *white cast iron* mengandung 1.8-3.6% kadar C, dan Si antara 0.5-1.9%, sehingga *white cast iron* termasuk jenis *low-silicon cast iron* yang mempunyai sifat yang getas.

2.7. Jenis Patahan

Perpatahan adalah fenomena terpisahnya satu material menjadi 2 bagian atau lebih yang disebabkan oleh suatu tegangan. Hal ini dapat terjadi dikarenakan kurangnya control pada suatu komponen sehingga menyebabkan terjadinya over load pada komponen tersebut yang besarnya melebihi kekuatan Tarik dari bahan sehingga menyebabkan bahan mengalami patahan. Mekanisme terjadinya suatu patahan terdiri dari 3 tahap, yakni :

a. Inisiasi

Tahapan awal terjadinya retak. Pada umumnya, inisiasi terjadi pada permukaan logam. Hal ini dapat terjadi karena adanya konsentrasi tegangan, cacat, ketidaksempurnaan permukaan, dan lain – lain.

b. Perambatan retak

Pada tahap ini, retak yang terjadi akan merambat ke dalam akibat pembebanan yang fluktuatif. Kecepatan rambatan retak tergantung pada besarnya pembebanan. Perambatan ini akan menimbulkan berkas berupa beach mark dan striasi pada permukaan patahan.

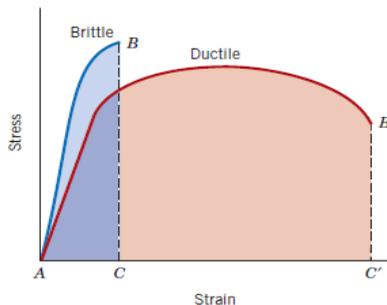


c. Patahan akhir

Pada tahap ini, permukaan sudah tidak dapat menahan beban sehingga permukaan material akan patah.

Berdasarkan pola pada permukaan patahan, perpatahan dibagi menjadi 4 jenis, yakni perpatahan ulet (ductile fracture), perpatahan getas (brittle fracture), perpatahan fatik (fatigue fracture) dan perpatahan dekohesif (decohesive rupture).

Dalam rekayasa material terdapat dua jenis mode patahan yang mungkin terjadi yaitu patahan ulet dan patah getas. Klasifikasi jenis patahan ini berdasarkan kemampuan sebuah material dalam menerima deformasi plastis yang dapat menyerap energi yang besar sebelum terjadi patahan. Material yang ulet mempunyai deformasi plastis yang tinggi, pembentukan small cavity diujung retak, serta retak memanjang atau menjalar bertahap. Sedangkan pada material yang getas mempunyai deformasi plastis rendah, tegangan lokal meningkat pada ujung retak sehingga retak menjalar dengan sangat cepat. Pada Gambar 2.11 ditunjukkan diagram tegangan dan regangan dari patahan ulet dan getas.



Gambar 2.11 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan(Callister,2007)

Patahan ulet dan getas pada suatu material tergantung pada kondisi pembebanan. Pada proses terjadinya patahan melibatkan dua tahap yaitu terbentuknya retak dan perambatan

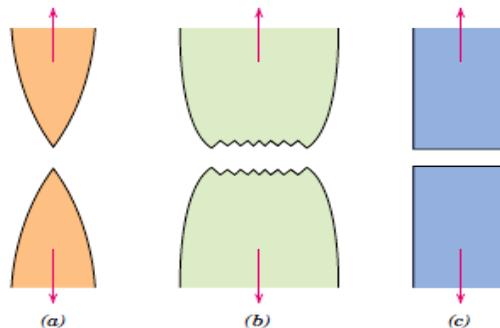


sebagai respon dari tegangan yang dialami oleh material. Modus patahan sangat bergantung pada perambatan retak.

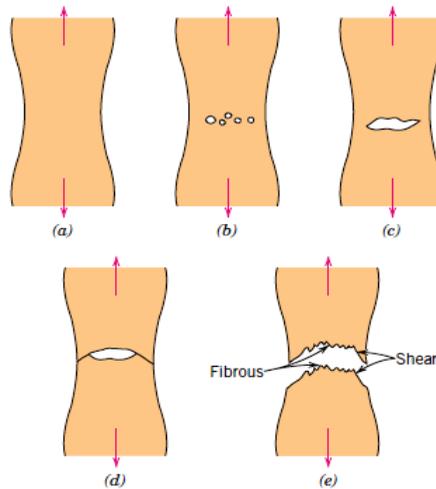
2.7.1. Perpatahan Ulet (Ductile Fracture)

Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada Gambar 2.12 ditunjukkan skematik representatif dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.12 (a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.12 (b) dimana patahan didahului oleh adanya *necking*. Proses patahan ulet dari material terjadi dalam beberapa tahap. Pertama, setelah terjadi pengecilan luasan setempat (*necking*) *cavities* kecil atau *microvoid* terbentuk di dalam struktur material seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.13.



Gambar 2.12 a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi *necking*, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007)



Gambar 2.13 Tahap patahan cup and cone (a) awal *necking*, (b) terbentuknya cavity kecil, (c) pengumpulan *cavity* hingga menjadi retakan, (d) perambatan retak, (e) patahan geser dengan sudut 45° terhadap arah tegangan (Callister, 2007)

Kemudian dengan bertambahnya deformasi akibat tegangan maka *microvoid* membesar dan berkumpul menjadi satu yang kemudian *coalesce* membentuk retak secara elips yang memiliki panjang tegak lurus dari arah pembebanan. Retak kemudian tumbuh sejajar dengan arah pembebanan, akhirnya patahan terbentuk oleh perambatan retak yang cepat disekitar area *necking* seperti Gambar 2.13 oleh deformasi geser pada sudut disekitar arah tegangan tarik dimana sudut ini merupakan tegangan geser tertinggi. Terkadang sebuah patahan mempunyai karakteristik kontur seperti *cup* dan *cone* karena salah satu permukaan patahan menyerupai *cone*. Spesimen yang mempunyai bentuk patahan seperti ini berbentuk fibrous yang tidak teratur dimana hal ini menandakan deformasi plastis. Lebih jauh lagi untuk mengetahui informasi mengenai penentuan secara pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope*

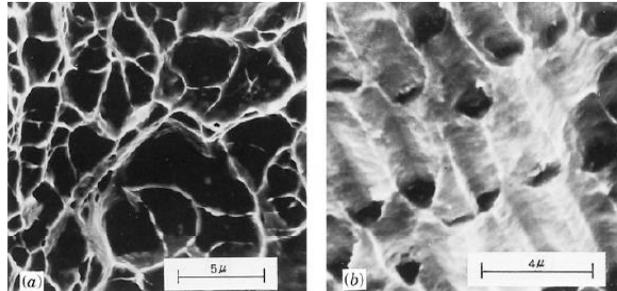


(SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi darimikroskopik optik. Gambar 2.14 menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*.



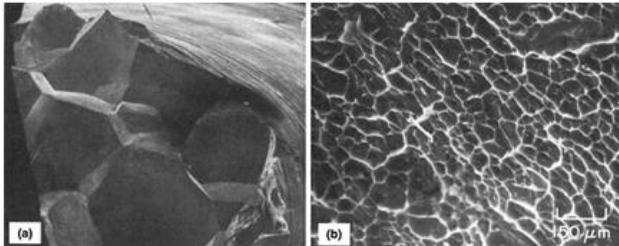
Gambar 2.14 a) patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium.(b)patah getas pada *mild steel* (Wulpi,1999)

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*.Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjalaran retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 (a) SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik, patahan hasil beban tarik *uniaux*, 3300x.(b) SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister,2007)

Apabila dilihat menggunakan SEM, pada morfologi patahan ulet akan terlihat cekungan – cekungan (dimple) yang membentuk sudut 45° . seperti pada gambar 2.16



Gambar 2.16. Permukaan patahan Al-4.2 Cu Alloy setelah mengalami pengujian tensile (a) perbesaran 10x (b) perbesaran 500x

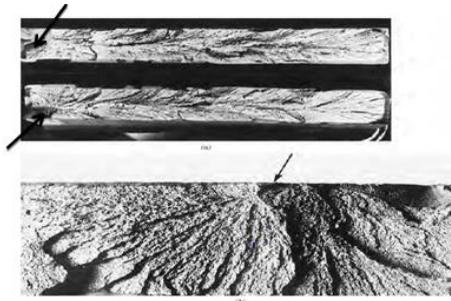
2.7.2. Perpatahan Getas (Brittle Fracture)

Perpatahan getas adalah jenis patahan yang ditandai dengan penjalaran retak yang lebih cepat dibandingkan dengan perpatahan ulet. Pada perpatahan getas, penyerapan energy hanya terjadi sedikit dan tidak dijumpai adanya deformasi plastis. Secara makro dapat dijumpai pada permukaannya bergranul, rata dan mengkilap. Biasanya pada permukaan patahan juga akan dijumpai

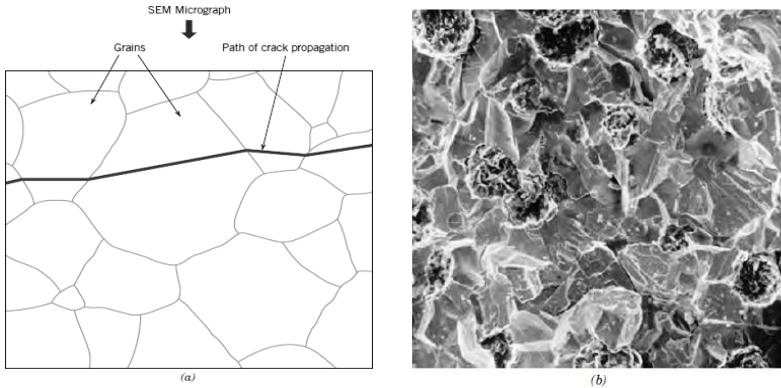


chevron mark, yakni garis – garis sejajar yang menunjukkan penjarangan retakan.

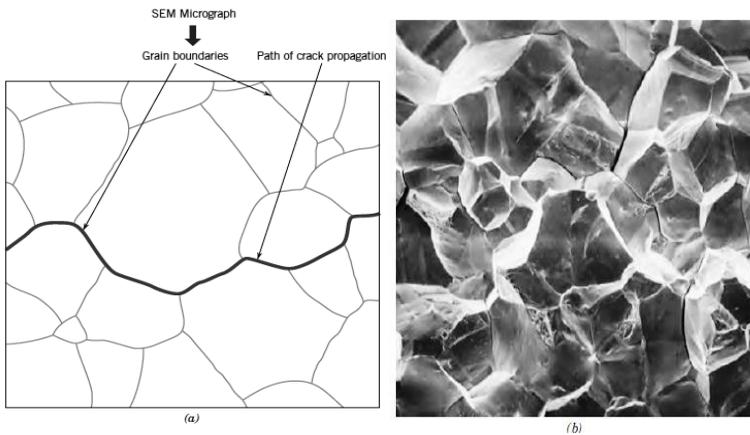
Perpatahan getas dapat terjadi karena disebabkan oleh beberapa faktor, seperti adanya konsentrasi tegangan, adanya tegangan tarik dan kondisi lingkungan yang bertemperatur rendah. Patah getas sering terjadi tanpa adanya atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Retak/ patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (*transgranular*). Kemudian pada material lunak dengan butir kasar (*coarse grain*) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan *chevron* seperti Gambar 2.17 (a) atau patah getas permukaan terlihat garis atau daerah asal retakan disebut *fan pattern* seperti pada Gambar 2.17(b). Untuk hasil perambatan dan SEM, dapat terlihat jelas untuk retak yang melewati batas butir (*transgranular*) dan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) pada gambar 2.18 dan 2.19.



Gambar 2.17 (a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karakteristik patah getas. (b) Foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan. (Callister,2007)



Gambar 2.18 (a) skema perambatan retak yang melewati butir (*transgranular*) (b) hasil SEM dari patah secara *transgranular* (Callister,2007)

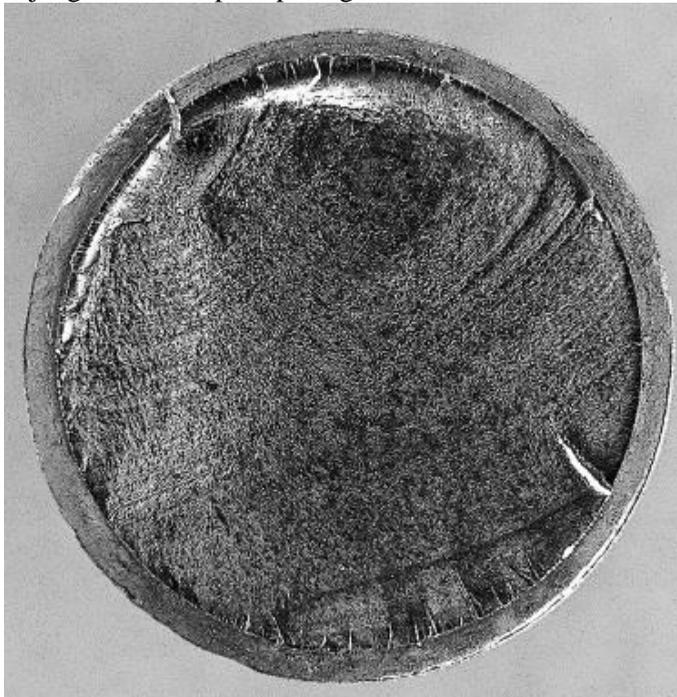


Gambar 2.19 (a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) (b) hasil SEM dari patah secara *intergranular* (Callister,2007)



2.7.3 Perpatahan Fatik (Fatigue Fracture)

Perpatahan ini dapat terjadi akibat adanya pembebanan yang berulang – ulang meskipun tegangannya masih di bawah tegangan yield material. Perpatahan ini mengalami sedikit sekali deformasi plastis atau hampir tidak ada. Perambatan retaknya berbeda dibandingkan dengan perpatahan ulet dan perpatahan getas, yakni adanya retak halus yang merambat akibat beban yang fluktuatif. Pada permukaan patahannya akan dijumpai *beach mark* yakni garis – garis yang menunjukkan terjadinya deformasi plastis pada ujung retakan, seperti pada gambar 2.20.

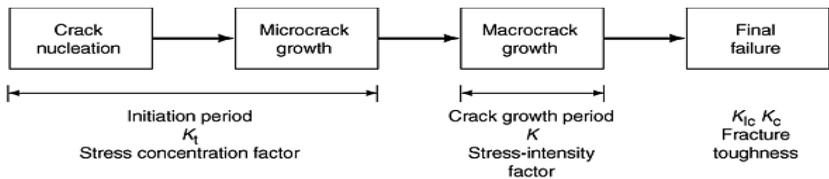


Gambar 2.20. Beach mark pada permukaan patahan yang terlihat jelas dari sebuah shaft



2.7.4 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjarangan retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah (tahap *final failure*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.21 dibawah ini



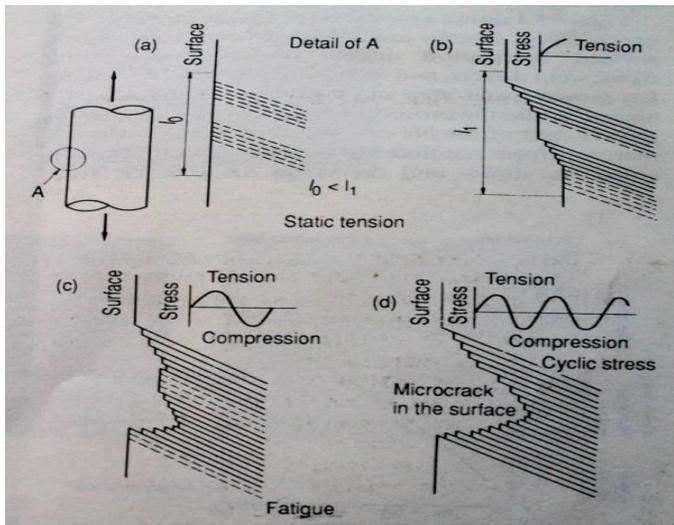
Gambar 2.21 Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 *Fatigue and Fracture*,2002)

Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue*, yaitu : (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002):

1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*

a) Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam akan menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak secara sederhana diberikan oleh Wood. Beberapa model diberikan dalam menjelaskan *fatigue crack* pada gambar 2.22.



Gambar 2.22 Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, Shin-ichi,1992)

Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama. Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).

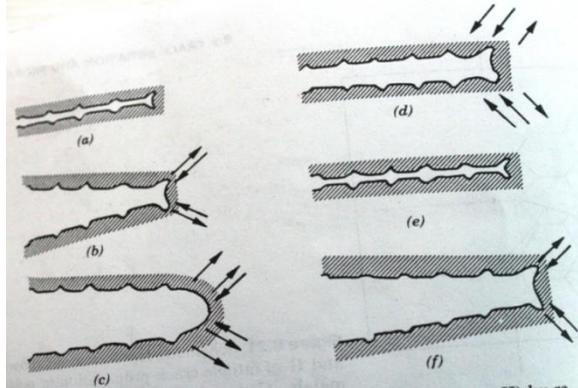
b) Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Hal ini mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak. Awal retakan mula-mula akan



menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak akan menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I

Selanjutnya pertumbuhan retak pada tahap II ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retak pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Adapun model mekanisme crack secara plastis terdapat pada Gambar 2.23 dibawah ini.



Gambar 2.23 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan besar (e) beban tekan nol (f) beban tekan kecil (Callister,2007)

2.7.5 Karakteristik Patahan

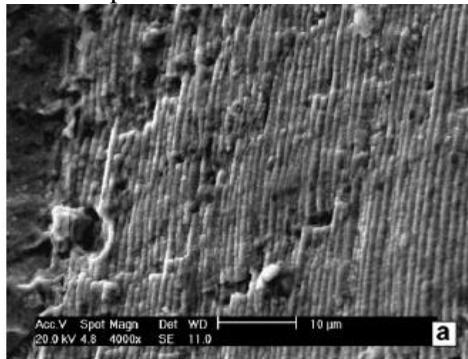
Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patahlelah (*fatigue*), dan patah merangkak (*creep/monotonic*). Masing-masing dari jenis patahan diatas memiliki karakteristik tersendiri. Berikut adalah karakteristik dasar untuk membedakan jenis patah lelah dengan patah merangkak, jenis patah getas dengan patah



ulet pada skala makro, dan jenis patah getas dengan patah ulet pada skala mikro (*ASM Handbook Committee Volume 12, 2002*):

1. Perbedaan karakteristik antara patah lelah dengan patah merangkak

Beachmarks dan striasi mengindikasikan patah lelah, sedangkan pada patah merangkak parameter tersebut tidak terlihat. Pertanda kehadiran beach marks bisa diketahui melalui pengamatan makro menggunakan *stereomicroscope*, dan striasi hanya bisa diamati pada saat dilaksanakan *SEMfractography*. Profil *beachmarks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi beban yang diberikan pada benda.



Gambar 2.24 Foto SEM yang menunjukkan *Beachmarks* dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005)

2. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala makro

Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pola patah getas ditunjukkan dengan permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis

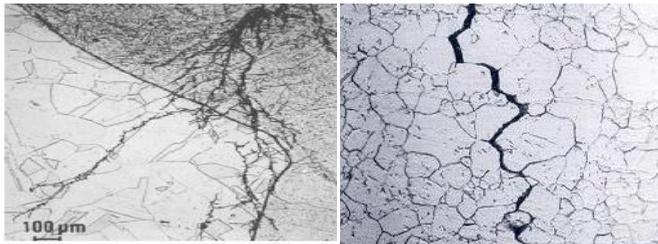


sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, terdapat pola patahan gabungan (*mix-mode appearance*) baik patah getas yang bertransformasi jadi ulet ataupun patah ulet yang bertransformasi menjadi getas. Kebanyakan kasus yang terjadi adalah patah getas bertransformasi menjadi patah ulet.

3. Perbedaan karakteristik antara patah getas dengan patah ulet pada skala mikro

Pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjaralan retakan mikro (*micro voids coalescence*). Sedangkan patah getas ditandai dengan salah satu dari fenomena berikut:

- Patahan melintasi butiran atau patah transgranular, dikenal dengan nama *cleavage*, ditunjukkan pada Gambar 2.25 (a)
- Patahan melewati batas butir atau patah intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*, ditunjukkan pada Gambar 2.25 (b)



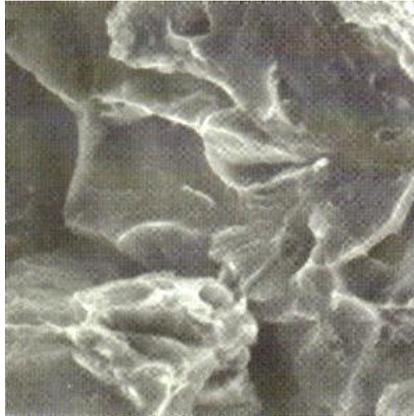
Gambar 2.25 Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular (Colangelo, 1989)

2.7.6. Perpatahan Dekohesif (Decohesive Rupture)

Perpatahan dekohesif adalah jenis patahan yang diakibatkan oleh melemahnya ikatan sepanjang batas butir atau



memotong batas butir pada suatu material. Pelemahan ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adanya inklusi, endapan, void bahkan hidrogen.



Gambar 2.26. Perpatahan decohesive yang muncul pada batas butir C-Mn Alloy

2.8 Penelitian Sebelumnya

1. Strozzi, dkk (2015) dalam penelitiannya yang berjudul “*A repertoire of failures in connecting rods for internal combustion engines, and indications on traditional and advanced design methods*” mengemukakan bahwa tipikal kegagalan pada *connecting rod* mesin diesel biasanya disebabkan oleh tingkat pembebanan yang kurang stabil pada batang *connecting rod* dan bahan material yang kurang tepat sehingga akan menyebabkan material mengalami disfungsi.
2. Bai-yan He, dkk (2013) dalam penelitiannya yang berjudul “*Crack analysis on the toothed mating surfaces of a diesel engine connecting rod*”



menyatakan bahwa kegagalan pada *connecting rod* dikarenakan kesalahan pemilihan material serta perlakuan disetiap bagian tertentu sehingga kinerja *connecting rod* bertahan dalam waktu yang singkat. Untuk itu harus dilakukan perlakuan pada bagian yang mengalami beban siklik tertinggi.

3. Eka Febriyanti (2010), dalam penelitiannya yang berjudul “Analisa Kerusakan *Connecting Rod* Pada Mesin Diesel Kendaraan Bermotor” menyatakan bahwa adanya permasalahan pada sistem pelumasan berupa penurunan *supply lubricating oil* merupakan penyebab utama terjadinya kerusakan baut *connecting rod* pada mesin diesel.
4. M.N. Mohammed, dkk (2006), dalam penelitiannya yang berjudul “*Failure Analysis Of A Fractured Connecting Rod* “ menyatakan bahwa faktor yang menyebabkan *connecting rod* mengalami kegagalan adalah patah lelah yang merupakan hasil dari tegangan yang tinggi disertai inisiasi porositas .
5. M.Mohsin (2015), dalam penelitiannya yang berjudul “*Analysis of Fatigue Stresses on connecting rod subjected to concentrated loads*’ menyatakan bahwa penyebab kegagalan pada *connecting rod* adalah tegangan yang berulang dan tegangan diatas *Tensile Strength* nya
6. R.A Barizy (2014), dalam penelitiannya yang berjudul “*Failure analysis and fatigue performance evaluation of failed connecting rod*” menyatakan bahwa daerah kegagalan *connecting rod* adalah



bagian yang dekat dengan *small end* dimana gaya berpusat disitu.

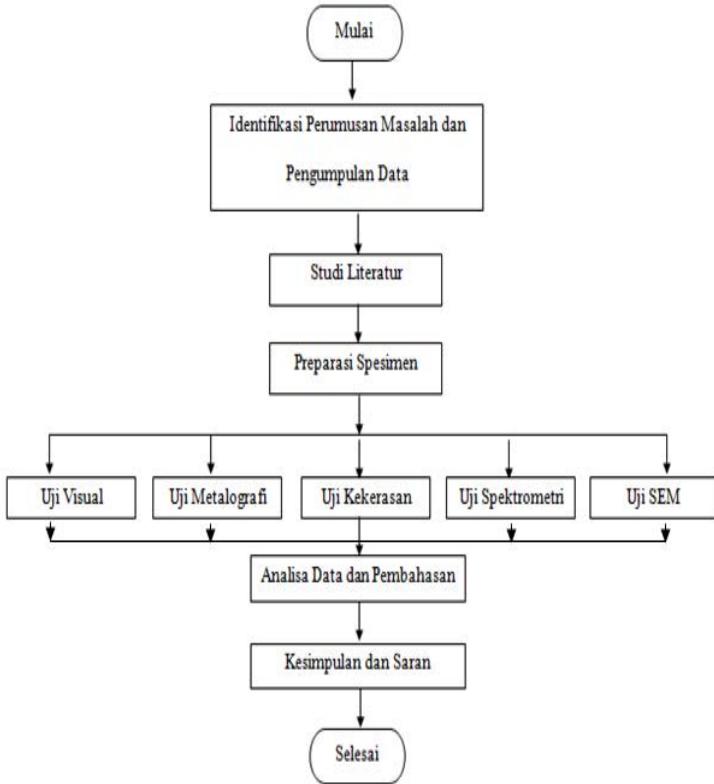


(halaman ini sengaja dkosongkan)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini akan melalui beberapa pengujian seperti ditunjukkan pada diagram alir di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini meliputi studi lapangan, studi literatur, dan pengujian. Berikut adalah hal-hal yang mencakup penelitian antara lain :

1. Studi Lapangan

Metode ini berupa pencarian informasi mengenai komponen yang akan diteliti beserta informasi mengenai kegagalan yang telah terjadi pada komponen. Pencarian informasi yang dilakukan dengan cara terjun langsung ke perusahaan yakni PT. Meratus Line Surabaya dan berdiskusi secara langsung dengan pihak PT. Meratus Line Surabaya serta dosen pembimbing.

2. Studi Literatur

Metode ini mengacu pada buku-buku, jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari permasalahan analisa kegagalan pada *Connecting Rod* untuk *auxiliary engine*.

3. Pengujian

Metode ini dilaksanakan dengan cara pengujian secara langsung sesuai prosedur dan metode yang ada. Adapun pengujian yang akan dilaksanakan dalam penelitian ini yaitu pengamatan secara visual mengenai bentuk patahan yang terjadi dengan menggunakan kamera dan mikroskop optik, pengamatan secara mikro dengan menggunakan mesin SEM, pengujian komposisi dengan menggunakan spektrometer, pengujian struktur mikro menggunakan mesin uji metalografi dan pengujian kekerasan untuk mengetahui distribusi kekerasan yang terjadi pada komponen.

3.3 Material yang Digunakan

Material uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah *connecting rod* tipe mahle yang digunakan pada *auxiliary engine* MAN D 2840 LE PT. Meratus Line Surabaya yang telah mengalami kegagalan.



Tabel 3.1 Data penunjang *Auxiliary engine*

Daya rata-rata yang dihasilkan mesin	274 KW
Gaya tekan Piston	87500 N
Panjang <i>connecting rod</i>	0.142 m
Luas penampang	660 mm ²



Gambar 3.2 Connecting Rod yang mengalami Kegagalan



3.4 Peralatan dan Bahan

3.4.1 Peralatan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Penggaris
2. Mesin Potong
3. Kamera Digital
4. Mesin Polish
5. *Stereo Mikroskop*
6. Mesin SEM
7. Mesin Spektrometer
8. Mesin Uji Kekerasan

3.4.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Resin
2. Kertas Gosok *Grade* 80 sampai 2000
3. Larutan Etsa

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Pengambilan dan persiapan Spesimen

Tahapan ini dilakukan dengan cara terjun langsung ke PT. Meratus Line Surabaya untuk melihat langsung dan pengambilan komponen yang mengalami kegagalan. Selain itu bertujuan untuk mendapatkan data-data perusahaan yang berkaitan dengan Connecting Rod tipe Mahle sebagai data awal penelitian. Data ini diperlukan sebagai pendukung dalam proses analisa kegagalan pada patahnya Connecting Rod yang meliputi dimensi, desain, dan data operasi.

3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap persiapan specimen diperlukan sebelum specimen diuji untuk menentukan penyebab terjadinya kegagalan material pada Connecting Rod. Persiapan yang dilakukan meliputi proses *cutting* dan *sectioning*.



Proses pemotongan dilakukan pada bagian ujung *crack* dan yang jauh dari *crack*. Hal ini bertujuan untuk membandingkan data yang diperoleh untuk material yang baru dengan material yang sudah rusak. Proses *sectioning* dilakukan untuk mendapatkan ukuran spesimen yang lebih proposional sesuai standar ukuran untuk pengamatan visual, pengujian SEM, pengujian komposisi, dan kekerasan.

3.5.3 Pengamatan Makroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan, dan lokasi material yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan ini menggunakan kamera digital untuk mendapatkan profil makronya.



Gambar 3.3 Kamera untuk melihat penampang makroskopis

3.5.4 Pengamatan Mikroskopik

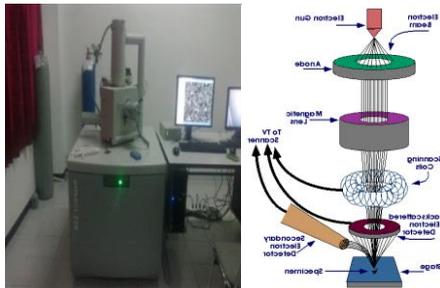
Pengamatan mikroskopik yang dilakukan adalah dengan menggunakan alat SEM (*Scanning Electron Microscope*) yang merupakan sebuah mikroskop yang didesain untuk menganalisa permukaan dari objek solid secara langsung.

Langkah-langkah dalam pengujian SEM adalah sebagai berikut :

1. Spesimen yang telah disiapkan kemudian dibersihkan dengan hati-hati menggunakan *blower* agar debu dan pengotor lainnya hilang.



2. Spesimen diletakkan di atas *holder* yang sebelumnya telah dilekatkan dengan *carbon tape*. *Carbon tape* berfungsi untuk melekatkan *holder* dengan sampel.
3. Spesimen yang telah dilekatkan pada *holder* dimasukkan ke dalam mesin SEM dan siap untuk dilakukan proses pengamatan. Proses pengamatan dilakukan dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan gambaram permukaan dari sampel yang diuji.



Gambar 3.4 Mesin SEM dan skema kerja mesin sem

3.5.5 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi kimia adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada komponen yang mengalami kegagalan. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat OES (*Optical Emission Spectroscopy*) untuk mengetahui komposisi kimia yang ada pada Connecting Rod tipe MAHLE.



Gambar 3.5 Mesin uji komposisi

3.5.6 Pengujian Metalografi

Pada pengamatan metalografi dengan mikroskop optik dilakukan untuk menganalisa fasa, bentuk, dan ukuran strukturmikro. Hal ini digunakan untuk mengetahui proses manufaktur yang terjadi pada material tersebut. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik Olympus BX51M-RF.

Pada pengujian metalografi dibagi menjadi dua tahap, yaitu:

1. Tahap persiapan
 - *Mounting* : Membuat cetakan pada spesimen dengan resin agar proses penggosokan menjadi lebih mudah
 - *Grinding* : Menggosok spesimen dengan kertas gosok grade 80 – 2000 dan dialiri dengan air. Spesimen diputar 90° atau tegak lurus terhadap arah gosokan ketika pindah grade.
 - *Polishing* : Memoles spesimen dengan pasta alumina di atas piringan yang berputar cepat. Proses ini akan menghasilkan permukaan yang mengkilat seperti cermin.
 - *Etching* : Mencelup permukaan spesimen ke dalam larutan nital 2% (Alkohol 98% dan HNO_3 2%)
2. Tahap pengamatan
 - Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro spesimen dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran.



Gambar 3. 6 Mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*

3.5.7 Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Vickers dimana dalam pengujiannya memakai indenter bola baja, pembebanan sebesar 30 kgf dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Mterial dan Metalurgi, ITS.



Gambar 3.7 Mesin uji kekerasan



3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.2 Rancangan penelitian spesimen

Bahan	Metalografi	SEM	Spektrometri	Hardness
Bagian	√	√	√	√
Crack				
Bagian	-	-	-	√
Jauh				
dari				
Crack				



(halaman ini sengaja dkosongkan)

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. ANALISA DATA

4.1.1 Record Komponen

Auxiliary engine adalah perangkat mesin di dalam kapal yang digunakan sebagai unit bantu yang menunjang kerja mesin penggerak utama (*main engine*) dan menggerakkan generator sebagai sumber utama penghasil listrik di atas kapal. Pada bulan juli 2015, *auxiliary engine* dengan tipe MAN D 2840 LE pada armada kapal PT Meratus Line mengalami masalah yang diakibatkan karena patahnya salah satu *connecting rod* di dalam ruang pembakaran. Berikut ini adalah data dari mesin yang mengalami kegagalan.

Tabel 4.1 Spesifikasi Dimensi *Connecting rod*

Dimensi	Jarak smaal end ke patahan (mm)	Diameter (mm)	Diameter small end (mm)	Diameter lekukan pada penampang batang (mm)
	134	45	62	6



Gambar 4.1 *Connecting Rod Mahle MAN D 2840 LE*

4.1.2. Hasil Uji OES

Pengujian spektrometri dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia penyusunnya, sehingga dapat diketahui apakah komposisi dari material ini sudah sesuai dengan standar atau belum. Data hasil dari pengujian spektrometri dapat dilihat pada tabel 4.1



Tabel 4.2 Data Hasil Uji Komposisi

Unsur	Kandungan (%)
Fe	balance
Mn	1.43
Si	0.555
C	2.95
Cr	0.15
Ni	0.102
Mo	0.012

Berdasarkan hasil pengujian komposisi pada komponen *connecting rod* ini diketahui bahwa kandungan unsur yang banyak terdeteksi adalah Fe balance, C 2.95%, Mn 1.43%, dan Si 0.555%.

Hasil dari pengujian OES ini mendekati dengan komposisi kimia *White cast iron* ASM Metals vol 9 pada table 2.2, dimana komponen ini termasuk *low-silicon cast iron* dan juga sesuai dengan standar data perusahaan, dimana *connecting rod* ini berjenis M-H.

4.1.3. Hasil Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan ini digunakan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada *connecting rod* yang mengalami kegagalan. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 6 titik, indentasi dilakukan pada daerah yang dekat dan jauh dari patahan dengan beban sebesar 30 kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 4.2 dan 4.3



Gambar 4.2 Indentasi bagian yang dekat dengan patahan

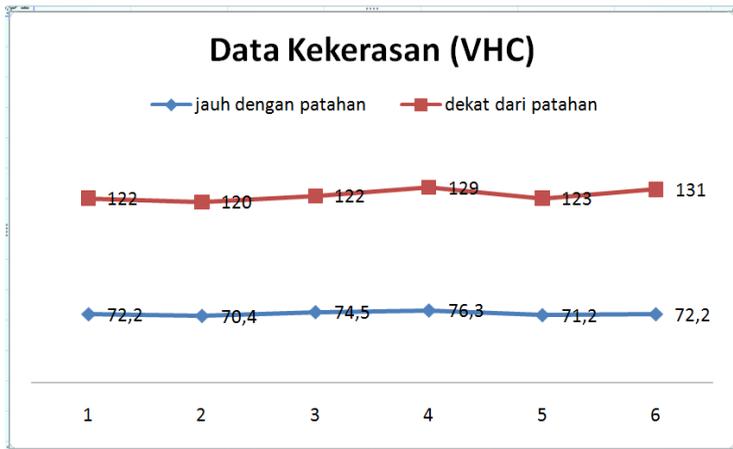


Gambar 4.3 Indentasi bagian yang jauh dengan patahan

Pada table 4.3 diperlihatkan bahwa nilai kekerasan yang diperoleh di daerah yang jauh dan dekat dari patahan serta grafik distribusi kekerasan. Dari gambar grafik 4.4 bisa dilihat perbedaan nilai kekerasan diaerah yang jauh dari patahan dan juga yang dekat dengan patahan. Didaerah yang jauh dari patahan memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 72.8 VHN, sedangkan yang dekat dengan patahan memiliki rata-rata nilai kekerasan sebesar 124 VHN.



Daerah Indentasi	VHN	
	Pada daerah yang jauh patahan	Pada daerah yang dekat patahan
1	72.2	122
2	70.4	120
3	74.5	122
4	76.3	129
5	71.2	123
6	72.2	131
<i>Average</i>	72.8	124.5



Gambar 4.4 Grafik distribusi kekerasan pada *connecting rod*



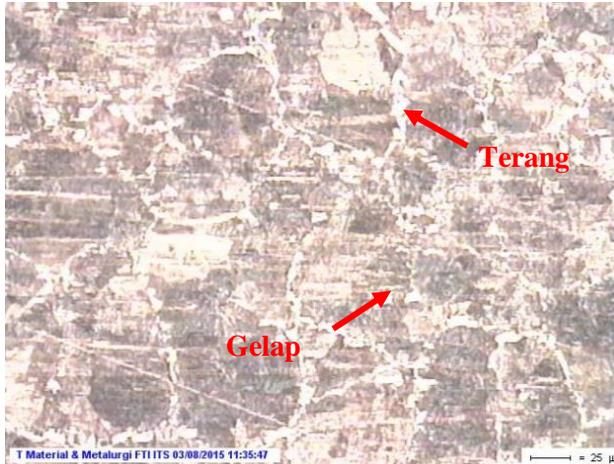
4.1.4. Hasil Uji Metalografi



Gambar 4.5. Hasil metalografi dari connecting rod. Perbesaran 10x (etsa: Nital)



Gambar 4.61. Hasil metalografi dari connecting rod. Perbesaran 20x (etsa: Nital)



Gambar 4.72. Hasil Uji Metalografi Connecting Rod perbesaran 50x

Dari hasil uji metalografi, didapatkan gambar mikrostruktur dari *connecting rod* yang mengalami patahan. Dari gambar tersebut dapat dilihat bagian yang gelap dan bagian yang terang. Bagian yang gelap menunjukkan fasa perlit dan sedangkan bagian yang putih menunjukkan fasa sementit. Hal ini dapat disimpulkan bahwa material dari *connecting rod* tersebut adalah *white cast iron*, karena dari ciri – cirinya menunjukkan adanya fasa perlit dan adanya jaringan sementit pada batas butir yang diakibatkan karena karbon tidak sempat berubah menjadi grafit pada proses pendinginan cepat. Hal ini dibuktikan dengan diagram fasa Fe-Fe₃C pada gambar 2.9 dan 2.10 dimana struktur mikronya terdiri atas perlit dan sementit, serta didinginkan dengan cepat.

Pada manual book MAHLE menunjukkan bahwa casting iron yang memiliki mikrostruktur yang sama dengan material *connecting rod* ini adalah jenis M-H dengan spesifikasi material sebagai berikut :



Tabel 4.4 Jenis MAHLE Cast Iron yang digunakan oleh PT. MERATUS beserta spesifikasinya

Description	Austenitic cast iron for ring carriers			Cast iron with spheroidal graphite for pistons and piston skirts
	M-H (lamellar)	M-K (spherulithic)	M-S70 (EN GJS 700-2)	
Alloying elements [Percent by weight]	C	2.4–2.8	2.4–2.8	3.5–4.1
	Si	1.8–2.4	2.9–3.1	2.0–2.4
	Mn	1.0–1.4	0.6–0.8	0.3–0.5
	Ni	13.5–17.0	19.5–20.5	0.6–0.8
	Cr	1.0–1.6	0.9–1.1	–
	Cu	5.0–7.0		<0.1
	Mo			
	Mg		0.03–0.05	0.04–0.06
Brinell hardness HBW 30		120–150	140–180	240–300
Tensile strength F_m [MPa]	20°C	190	380	700
	100°C	170		640
	200°C	160		600
	300°C	160		590
	400°C	150		530
Yield strength $F_{p0.2}$ [MPa]	20°C	150	210	420
	100°C	150		390
	200°C	140		360
	300°C	140		350
	400°C	130		340
Elongation at fracture A_5 [%]	20°C	2	8	2
Fatigue strength σ_{bw} [MPa]	20°C	150		250
Young's modulus E [MPa]	20°C	100,000	120,000	177,000
	200°C			171,000
Thermal conductivity λ [W/mK]	20°C	32	13	27
Thermal expansion α [10^{-6} m/mK]	20–200°C	18	18	12
Density ρ [g/cm ³]	20°C	7.45	7.4	7.2

Pada Tabel 4.4 dijelaskan jenis *Connecting rod* yang digunakan oleh PT. MERATUS beserta spesifikasinya. Dimana terdapat 3 jenis yaitu M-H yang mempunyai struktur mikro *white cast iron*, dan M-K M-S70 yang mempunyai struktur mikro *nodular cast iron*.

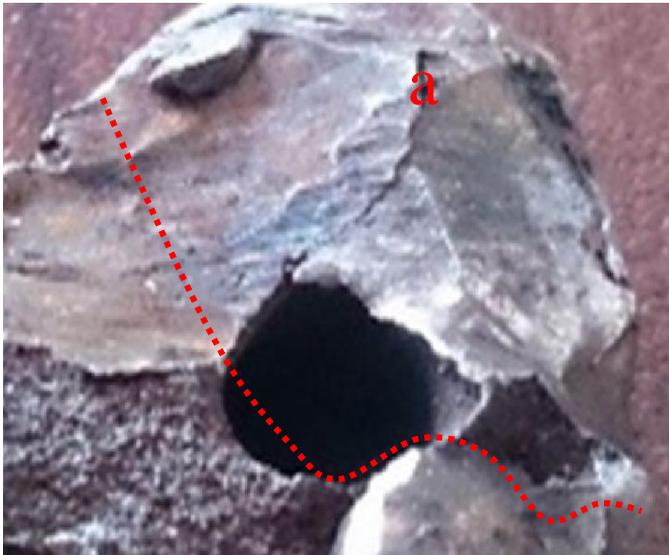


4.1.5 Pengamatan Visual

Dalam pengamatan visual ini terlihat bahwa patahan berawal dari ujung sebelah kanan dimana bias dilihat pada gambar 4.9 gambar a dimana terdapat garis rambatan seperti ditunjukkan oleh gambar a.



Gambar 4.8 Penampang patahan Connecting Rod



Gambar 4.9 Daerah *initial crack* pada connecting rod



Pada penampang patahan juga menunjukkan adanya ciri – ciri dari patahan getas yakni permukaan patahan yang kasar serta permukaan patahan yang mengkilap seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10 dengan panah. Ini dikarenakan material yang digunakan bersifat getas dan menerima tegangan siklik, sehingga mengalami fatigue. Hal ini juga diperkuat dengan hasil pengujian sem pada gambar 4.12 4.13 dan 4.14 yang menunjukkan permukaan patahan yang kasar dan terdapat beberapa porositas pada permukaan patahan



Gambar 4.10 Daerah perambatan retak

Selain itu juga terdapat pola patahan yang membentuk butir – butir, hal tersebut adalah menunjukkan bahwa patahan yang terjadi termasuk jenis patahan getas *transgranular*.

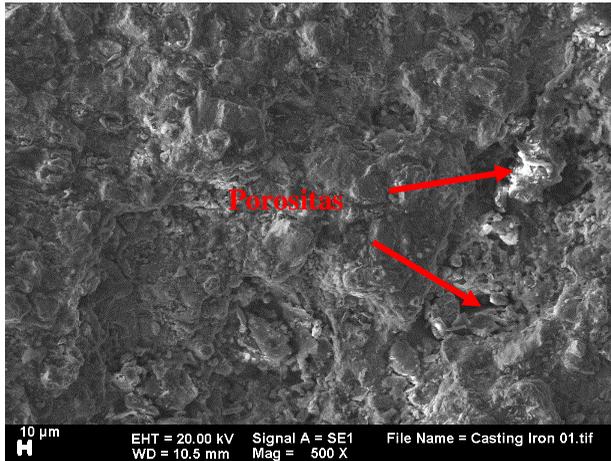


Gambar 4.11 Daerah Patah akhir

Seperti yang terlihat daerah ini adalah daerah patah akhir yang ditandai dengan adanya butir-butir kasar serta tidak adanya rambatan retakan, sehingga ini adalah daerah patah akhir.

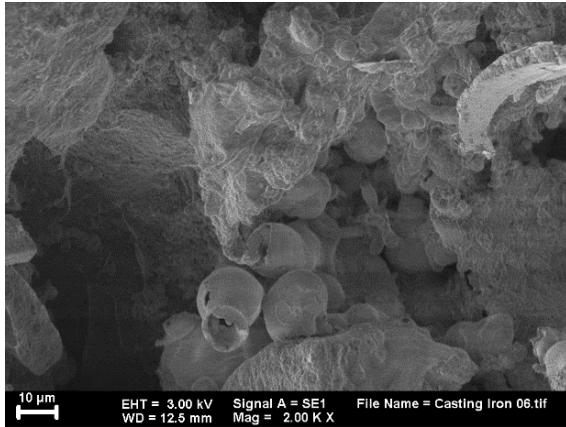


4.1.6. Hasil Pengujian SEM Permukaan Patahan

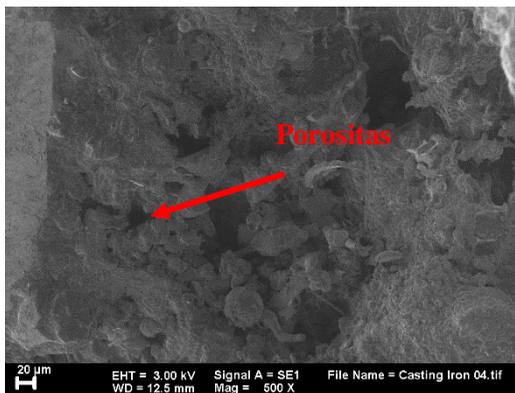


Gambar 4.12 Foto SEM bagian tengah permukaan patahan connecting rod tipe MAHLE (perbesaran 500x)

Pada gambar 4.12 bisa dilihat bahwa jenis rambatan retak melewati batas butir, sehingga ini adalah jenis patahan getas *transgranular*. Pada gambar 4.13 dan 4.14 terlihat bagian yang mengalami porositas yang merupakan ciri-ciri bahwa *connecting rod* mengalami patah getas.



Gambar 4.133 Hasil SEM permukaan patahan (perbesaran 2000x)



Gambar 4.144 Foto SEM bagian ujung permukaan patahan connecting rod tipe MAHLE (perbesaran 500x)

Pada gambar 4.13 dan 4.14 terlihat bahwa porositas terjadi disepanjang rambatan retakan seperti yang ditunjukkan oleh anak panah diatas dan ini mengindikasikan bahwa patahan yang terjadi adalah patah getas.



4.2. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan. Pengujian komposisi kimia menunjukkan bahwa sebagian besar komposisi dari *connecting rod* ini adalah Fe balance, C 2.95%, Mn 1.43%, Si 0.555% dan komposisi kecil lainnya yang merupakan komposisi dari *cast iron* yang sesuai dengan standar komposisi kimia cast iron ASM Metals vol 9 pada table 2.2 yang menunjukkan bahwa komponen ini adalah low-silicon cast iron yang bersifat getas. Hal ini diperkuat dengan hasil uji metalografi Bagian yang gelap menunjukkan fasa perlit dan sedangkan bagian yang putih menunjukkan fasa sementit. Hal ini dapat disimpulkan bahwa material dari *connecting rod* tersebut adalah *white cast iron*, karena dari ciri – cirinya menunjukkan adanya fasa perlit dan adanya jaringan sementit pada batas butir yang diakibatkan karena karbon tidak sempat berubah menjadi grafit pada proses pendinginan cepat. Hal ini dibuktikan dengan diagram fasa Fe-Fe₃C pada gambar 2.9 dan 2.10 dimana struktur mikronya terdiri atas perlit dan sementit, serta didinginkan dengan cepat dan sesuai dengan data perusahaan, yaitu tipe MAHLE M-H

Dari hasil pengujian kekerasan menggunakan Vickers menunjukkan adanya kenaikan kekerasan pada daerah yang dekat dengan patahan, kenaikan ini disebabkan karena tegangan yang bekerja pada daerah dekat dengan patahan lebih tinggi dibandingkan dengan daerah yang jauh dari patahan. Penyebab tegangan lebih tinggi ini adalah pemusatan gaya yang berpusat di titik patah.

Dalam pengujian SEM dapat dilihat bahwa terdapat patahan-patahan yang melewati batas butir, dan terdapat porositas didaerah perambatan retaknya, ini mengindikasikan bahwa *connecting rod* ini mengalami patah getas transgranular.

Dari data perusahaan juga diketahui bahwa jenis *connecting rod* yang digunakan ada 3 tipe yaitu M-H, M-K dan M-S70 dimana *connecting rod* yang mengalami



kerusakan ini adalah *connecting rod* yang berjenis M-H yang berkomposisi *white cast iron* dimana jenis M-H ini adalah jenis *connecting rod* dengan kekuatan yang paling rendah. *White cast iron* memiliki sifat yang keras dan tahan aus, tetapi sangat getas jika dibandingkan dengan dua tipe *connecting rod* yang lain.

Tegangan yang terjadi pada *connecting rod* saat mesin beroperasi menurut perhitungan persamaan 2.1 dan 2.2 adalah sebesar $132,57 \text{ N/mm}^2$, dimana gaya ini masih dibawah dari *Yield Strength* dari *connecting rod* tipe M-H sebesar 150 N/mm^2 , sehingga dapat disimpulkan bahwa *connecting rod* mengalami kegagalan dikarenakan gaya terus – menerus sehingga menimbulkan kelelahan material.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Testing and adjusting values	
Thickness of connecting rod bearing shells	
standard size	
Glyco	2.461 to 2.473 mm
Miba	2.462 to 2.472 mm
standard size 1 (0.10 mm oversize)	
Glyco	2.510 to 2.522 mm
Miba	2.512 to 2.522 mm
oversize 0.25 mm	
Glyco	2.585 to 2.597 mm
Miba	2.587 to 2.597 mm
oversize 0.50 mm	
Glyco	2.710 to 2.722 mm
Miba	2.712 to 2.722 mm
oversize 0.75 mm	
Glyco	2.835 to 2.847 mm
Miba	2.837 to 2.847 mm
oversize 1.00 mm	
Glyco	2.960 to 2.972 mm
Miba	2.962 to 2.972 mm
Max. difference in weight per conrod set	50 g
Bearing basic bore	
max. deviation of bore perpendicular to supporting surface	0.035 mm
max. deviation of bore parallel to piston pin inside bore	0.02 mm

Gambar 1 Spesifikasi dimensi Connecting Rod tipe MAHLE

Connecting rods	
Piston pin bushing inside diameter	46.055 to 46.065 mm
Piston pin radial play in connecting rod	0.085 to 0.071 mm
Conrod width at small end	35.341 to 35.380 mm (dia. 35.5 c8)
Conrod crank pin width	71.000 to 71.120 mm (71 H10)
Conrod axial play	0.240 to 0.438 mm
Conrod bearing radial play	0.058 to 0.124 mm
Bearing shell bore in connecting rod	95.000 to 95.022 mm (dia. 95 H6)
Spread of conrod bearing shells (new bearing shells only)	
Glyco	0.6 to 1.5 mm
Miba	0.5 to 1.4 mm
Spread distance	
Glyco	95.6 to 96.5 mm
Miba	95.5 to 96.4 mm
Bearing inside bore in installed condition	
D 25, M- and D 28, LE-Engines	
N	90.064 to 90.106 mm
N I	89.964 to 90.006 mm
Rep. 1	89.814 to 89.856 mm
Rep. 2	89.564 to 89.606 mm
Rep. 3	89.314 to 89.356 mm
Rep. 4	89.064 to 89.106 mm
Wall thickness of connecting rod bearing shells	
standard size	2.463 to 2.473 mm
standard size I (0.10 mm oversize)	2.513 to 2.523 mm
oversize 0.25 mm	2.588 to 2.598 mm
oversize 0.50 mm	2.713 to 2.723 mm
oversize 0.75 mm	2.838 to 2.848 mm
oversize 1.00 mm	2.963 to 2.973 mm
Bearing bore in installed condition	
D 28, M-Engines	
Glyco	
standard size	90.075 to 90.120 mm
standard size I	89.975 to 90.020 mm
Rep. 1	89.825 to 89.870 mm
Rep. 2	89.575 to 89.620 mm
Rep. 3	89.325 to 89.370 mm
Rep. 4	89.075 to 89.120 mm
Miba	
standard size	90.058 to 90.104 mm
standard size I	89.958 to 90.004 mm
Rep. 1	89.808 to 89.854 mm
Rep. 2	89.558 to 89.604 mm
Rep. 3	89.308 to 89.354 mm
Rep. 4	89.058 to 89.104 mm

Gambar 2 Spesifikasi dimensi Connecting Rod tipe

MAHLE

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Faktor yang menyebabkan kegagalan komponen *connecting rod* MAHLE pada mesin MAN D 2840 LE PT. Meratus Line Surabaya yaitu patahan getas *transgranular*, dan kelelahan pada material yang disebabkan tegangan yang terus menerus.
2. Mekanisme kegagalan *connecting rod* ini terjadi karena material mengalami kelelahan yang dikarenakan oleh beban siklik yang terus menerus, dan karena material ini bersifat getas, sehingga yang terbentuk adalah patah getas, dalam hal ini patah getas *transgranular*.

5.2 Saran

Berdasarkan Hasil dari penelitian ini dapat disarankan:

1. Benar – benar memahami spesifikasi material dari suatu alat sebelum diaplikasikan.
2. Perlu adanya inspeksi secara berkala pada *engine – engine* kapal sebelum terjadi kerusakan yang lebih parah yang dapat merugikan secara finansial.
3. Data yang diambil baik berupa besar kerja mesin, temperature kerja mesin, dan hal – hal detail lain perlu dikumpulkan untuk dijadikan bahan perhitungan secara berkala supaya kerusakan dapat dicegah sejak dini



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 2002. *ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2009. *ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- Anderson, T. (2005). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. Boca Raton: CRC Press.
- Avner, S. H. (1987). *Introduction to Physical Metallurgy*. Tokyo: McGraw-Hill International Book Company
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Colangelo, V.J. 1989. *Analysis of Metallurgical Failures Second Edition*. Singapore : John Wiley & Sons, Inc.
- Dantale, A. D., & Keche, A. J. (2014). Fatigue Life Validation and Analysis of Connecting Rod. *International Journal of Hybrid Information Technology Vol. 7, No. 6* , 423 - 432.
- Dieter, G. E. (1993). *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- He, B.-Y (2013). Crack Analysis on the Toothed Mating Surfaces of A Diesel Engine Connecting Rod. *Engine Failure Analysis 34* , 443-450.

- Hosford, W. F. (2005). *Mechanical Behaviour of Materials*.
Cambridge: Cambridge University Press.
- MAHLE GmbH. (2009). *Cylinder Components: Properties, Applications, Materials*. Stuttgart: Springer Verlag .
- MAHLE GmbH. (2013). *Pistons and Engine Testing*.
Stuttgart: Springer Science & Business Media.
- Mohammed, M., Omar (2011). Failure Analysis of Fractured Connecting Rod. *Journal of Asian Scientific Research* , 737 - 741.
- Pathade (2013). Stress Analysis of I.C.Engine Connecting Rod by FEM and Photoelasticity. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) Volume 6, Issue 1* , 117 - 125.
- Ramani (2012). Analysis of Connecting Rod under Different Loading Condition. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) Vol.1* .
- Son Ha, M. Y. (2011). Fretting Damage Prediction of Connecting Rod of Marine Diesel Engine. *Journal of Mechanical Science and Technology 25 (2)* , 441 - 447.

BIODATA PENULIS



Penulis mempunyai nama lengkap **Bayu Fahrudin**, dilahirkan di Jombang, 14 September 1993. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Pendidikan formal penulis menempuh pendidikan di SDN KEPUHREJO II SMPN 2 Jombang, SMAN 2 Jombang, dan setelah lulus dari SMAN penulis melanjutkan studinya di Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS.

Selain sebagai mahasiswa, penulis aktif di organisasi dan kepanitiaan, seperti Sekretaris Departemen Pengabdian Masyarakat, Koordinator Event Social Development BEM ITS, staf LDJ Ashabul Kahfi, serta menjadi OC (organizing committee) Silver Parade 4, Dazzling Moment, Metal gear dan KPU HMMT FTI ITS. Dapat dihubungi melalui email bayufah@gmail.com.