



TUGAS AKHIR - TL141584

**ANALISA KEGAGALAN PISTON TIPE MAHLE
PADA *AUXILIARY ENGINE* MAN D2866 LE
KAPAL MERATUS RED RELIANCE PT MERATUS
LINE**

Nico Bagus Putranto
NRP 2712 100100

Dosen Pembimbing :
Ir. Rochman Rochiem, M. Sc.
Mas Irfan P. Hidayat ,S.T., M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



TUGAS AKHIR - TL141584

FAILURE ANALYSIS OF PISTON MAHLE TYPE IN AUXILIARY ENGINE MAN D286 LE MERATUS RED RELIANCE SHIP PT MERATUS LINE

Nico Bagus Putranto
NRP 2712 100100

Dosen Pembimbing :
Ir. Rochman Rochiem, M. Sc.
Mas Irfan P. Hidayat ,S.T., M.Sc., Ph.D.

JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**ANALISA KEGAGALAN PISTON TIPE MAHLE PADA
AUXILIARY ENGINE MAN D2866 LE KAPAL MERATUS
RED RELIANCE PT MERATUS LINE**

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 :

NICO BAGUS PUTRANTO

NRP. 2712100100

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

Ir. Rochman Rochiem, M.Sc (Pembimbing 1)

Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)



**ANALISA KEGAGALAN PISTON TIPE MAHLE PADA
AUXILIARY ENGINE MAN D2866 LE KAPAL MERATUS
RED RELIANCE PT MERATUS LINE**

Nama : Nico Bagus Putranto
NRP : 2712 100 100
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Co- Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Piston tipe mahle merupakan salah satu bagian pada auxiliary engine MAN D2866 LE kapal Meratus Red Reliance. Pada januari 2015, piston tersebut mengalami patah sehingga memberhentikan kinerja mesin. Untuk mengetahui lebi lanjut penyebab kegagalan dari piston ini maka dilakukan analisis kegagalan dalam aspek metalurgi berupa pengamatan makro visual, mikro visual, metalografi, kekerasan brinell, dan uji komposisi OES. Dari hasil uji komposisi didapatkan bahwa material ini merupakan paduan aluminium silikon dengan kadar silicon 11.3%. Dari data pengujian kekerasan, didapatkan bahwa kekerasan di daerah dekat dengan patahan lebih tinggi dibandingkan dengan daerah yang jauh dari patahan. Hal ini dipengaruhi oleh pembebanan yang terpusat pada daerah pin piston. Selain itu, hasil dari pengujian metalografi pada daerah dekat dengan patahan tersebar merata eutektik AlSi. Dengan pengujian fraktografi didapatkan bahwa komponen piston ini mengalami patah lelah dikarenakan pembebanan yang berulang dan terpusat ada satu titik yaitu pin piston.

Kata kunci : Piston MAHLE, Aluminium-Silikon, Fatigue

**FAILURE ANALYSIS OF PISTON MAHLE TYPE IN
AUXILIARY ENGINE MAN D286 LE MERATUS RED
RELIANCE SHIP PT MERATUS LINE**

Nama : Nico Bagus Putranto
NRP : 2712 100 100
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Co- Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Mahle type of Piston is a part of auxiliary engine of MAN D2866 LE Red Reliance meratus machine. This piston was broken on January 2015, so it disturbed the machine work. To know further about the reason of the failure of this piston, the failure analysis was done in the metallurgy aspect formed of macro observation, micro observation, microvisual, metallography, brinell hardness, and OES composition experiment. From the result of experiment, it was known that this material is the combination of aluminium and silicon with the 11.3% amount of silicon. From the data of hardness experiment, it was known that the hardness near to fracture was higher than the far one. It is influenced by the burden centered in pin piston area. Beside of that, the area near to the fracture had many eutectic fase AlSi spread out evenly as the result of metallograph. By using fractograph experiment, it was known that the component of piston here suffered fatigue fracture because of repeated burdening and centered in a specific spot namely pin piston.

***Keyword : Piston MAHLE type, Aluminium-Silicon,
Fatigue***

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 Piston Tipe MAHLE pada Auxiliary Engine MAN D2866 LE Kapal Meratus Red Reliance PT Meratus Line.**

Pada kesempatan kali ini penyusun mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis Bapak Bagus Supriyadi dan Ibu Lestari atas semua dukungan moril dan materiil yang selalu dicurahkan.
2. Mbak Tanti, Bowo, Bulek Pit dan Bima yang selalu menemani penulis dalam hal apapun.
3. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem M.Sc dan Bapak Mas Irfan P. Hidayat S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan bekal yang sangat bermanfaat.
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. 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, Januari 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 LatarBelakang..... | 1 |
| 1.2 PerumusanMasalah..... | 2 |
| 1.3 BatasanMasalah..... | 2 |
| 1.4 TujuanPenelitian..... | 2 |
| 1.5 ManfaatPenelitian..... | 3 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Mesin Diesel..... | 5 |
| 2.2 Piston..... | 9 |
| 2.3 Aluminium..... | 10 |
| 2.4 Sifat Coran Paduan Aluminium..... | 13 |
| 2.5 Paduan Aluminium-Silikon (Al-Si)..... | 14 |
| 2.6 Silikon..... | 17 |
| 2.7 Analisa Kegagalan..... | 19 |
| 2.8 Prosedur dalam Analisa Kegagalan..... | 22 |
| 2.9 Jenis Patahan..... | 22 |
| 2.10 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah..... | 29 |
| 2.11 Karakteristik Patahan..... | 32 |
| 2.12 Penelitian Sebelumnya..... | 35 |
| 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 | 39 |
| 3.4.1 | Peralatan | 39 |
| 3.4.2 | Bahan | 40 |
| 3.5 | Tahapan Penelitian | 40 |
| 3.5.1 | Pengambilandan 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..... | | 43 |
| 4.1 | Analisa Data | 43 |
| 4.1.1 | Record Piston | 43 |
| 4.1.2 | Analisa Titik Kritis..... | 44 |
| 4.1.3 | Hasil OES..... | 45 |
| 4.1.4 | Hasil Pengujian Metalografi..... | 46 |
| 4.1.5 | Hasil Pengujian Kekeraan Brinell | 50 |
| 4.1.6 | Hasil Pengujian Fraktografi..... | 52 |
| 4.2 | Pembahasan | 58 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | | 65 |
| 5.1 | Kesimpulan..... | 65 |
| 5.2 | Saran..... | 65 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 67 |
| LAMPIRAN | | |

DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Gambar 2.1 Mesin Diesel MAHLE D2866 (MAN,2012)..... | 6 |
| Gambar 2.2 Skema Cara Kerja 4 Langkah (Harrington, 2008)..... | 7 |
| Gambar 2.3 Piston MAHLE pada mesin diesel D2866 (MAN,2012) | 9 |
| Gambar 2.4 Diagram Fasa Paduan Aluminium-Silikon (Warmuzek,2004) | 16 |
| Gambar 2.5 Mikrostruktur Paduan cor Aluminum-Silikon Komersial. (a) Mikrostruktur Paduan Hypoeutektik Sand Cast (1,65-12,6 wt% Si). (b) Mikrostruktur Paduan Eutektik Permanent Mold (12,6% Si). (c) Mikrostruktur Paduan Hypereutektik Die Cast (>12,6% Si) (Warmuzek, 2004)..... | 17 |
| Gambar 2.6 Struktur Kristal silikon (diamond cubic) (Callister,2007) | 19 |
| Gambar 2.7 Skematik ciri patah getas dan patah ulet dari diagram tegangan-regangan(Callister,2007)..... | 23 |
| Gambar 2.8 a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi <i>necking</i> , (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007) .. | 24 |
| Gambar 2.9 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)..... | 25 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2.10 (a) patah ulet (<i>cup and cone</i>) pada aluminium (b) patah getas pada <i>mild steel</i> (Callister,2007) | 26 |
| Gambar 2.11 (a) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik, patahan hasil beban tarik <i>unixial</i> , 3300x.(b) SEM yang menunjukkan <i>spherical dimple</i> karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister,2007) | 27 |
| Gambar 2.12 (a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karateristik patah getas. (b) Foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan. (Callister,2007)..... | 28 |
| Gambar 2.13 (a) <i>skema perambatan retak yang melewati</i> <i>butir (transgranular)</i> (b) <i>hasil SEM dari patah</i> <i>secara transgranular</i> (Callister,2007)..... | 28 |
| Gambar 2.14(a) <i>skema perambatan retak yang terjadi</i> <i>sepanjang batas butir (intergranular)</i> (b) <i>hasil SEM dari patah secara intergranular</i> (Callister,2007)..... | 29 |
| Gambar 2.15 Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 <i>Fatigue and Fracture</i> ,2002) | 29 |
| Gambar 2.16 Model Wood untuk pengintian retak (Nishida, Shin-ichi,1992)..... | 31 |
| Gambar 2.17 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil (Callister,2007)..... | 32 |
| Gambar 2.18 Foto SEM yang menunjukkan <i>Beachmarks</i> dan striasi secara mikro (Poursaedi, 2005) | 33 |
| Gambar2.19Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular (b) Intergranular (Colangelo, 1989) | 34 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian..... | 37 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 3.2 Piston Mahle yang mengalami kegagalan | 39 |
| Gambar 3.3 Kamera dan mikroskop stereo | 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 brinell | 45 |
| Gambar 4.1 Gambar Design piston MAHLE | 47 |
| Gambar 4.2 Hasil simulasi pemberian beban pada piston menggunakan <i>software</i> Inventor | 48 |
| Gambar 4.3 Struktur mikro AlSi perbesaran 100x pada material yang jauh dari patahan | 50 |
| Gambar 4.4 Struktur mikro AlSi perbesaran 200x pada material yang jauh dari patahan | 51 |
| Gambar 4.5 Struktur mikro AlSi perbesaran 500x pada material yang jauh dari patahan | 51 |
| Gambar 4.6 Struktur mikro AlSi perbesaran 100x pada material yang dekat dari patahan | 52 |
| Gambar 4.7 Struktur mikro AlSi perbesaran 200x pada material yang dekat dari patahan | 52 |
| Gambar 4.8 Struktur mikro AlSi perbesaran 500x pada material yang dekat dari patahan..... | 53 |
| Gambar 4.9 Pembagian daerah indentasi uji kekerasan brinell | 54 |
| Gambar 4.10 Grafik distribusi kekerasan pada piston..... | 56 |
| Gambar 4.11 Pembagian daerah patahan pada piston | 56 |
| Gambar 4.12 Perbesaran pada daerah initial crack (a) diambil dengan mikroskop stereo 10x | 58 |
| Gambar 4.13 Daerah initial crack perbesaran 50x dengan SEM | 58 |
| Gambar 4.14 Daerah initial crack dengan perbesaran 500x dengan SEM | 59 |

| | | |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4.15 | Perbesaran pada daerah crack propagation (b) diambil dengan mikroskop stereo perbesaran 10x..... | 60 |
| Gambar 4.16 | Daerah perambatan retak dengan perbesaran 100x dengan SEM, tampak perbedaan ketinggian yang nyata pada permukaan patahan..... | 60 |
| Gambar 4.17 | Daerah perambatan retak perbesaran 500x dengan SEM. Terlihat butiran butiran yang menandai ciri ciri patah transgranular. | 61 |
| Gambar 4.18 | Daerah patah akhir menggunakan stereo mikroskop perbesaran 10x | 62 |
| Gambar 4.19 | Daerah patah akhir dengan SEM perbesaran 1000x..... | 62 |

DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabel 2.1 Data teknik mesin diesel MAHLE D2866 | 6 |
| Tabel 2.2 <i>Firing Order</i> untuk mesin bersilinder jamak..... | 10 |
| Tabel 2.3 Klasifikasi Aluminium Tuang (<i>cast Aluminum</i>) sesuai standar AA..... | 11 |
| Tabel 2.4 Standar Aluminium Forming (Yudy, 2008)..... | 13 |
| Tabel 2.5 Sifat Fisik dan Mekanik Silikon (William C. O'Mara, 1990)..... | 20 |
| Tabel 2.6 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin | 20 |
| Tabel 2.7 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin | 18 |
| Tabel 2.8 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin | 21 |
| Tabel 3.1 Spesifikasi dimensi Piston tipe MAHLE..... | 39 |
| Tabel 3.2 Rancangan penelitian spesimen..... | 45 |
| Tabel 4.1 Spesifikasi Dimensi Piston..... | 48 |
| Tabel 4.2 Data Hasil Uji Komposisi..... | 49 |
| Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Kekerasan | 55 |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LatarBelakang

Dalam industri perkapalan, faktor keselamatan sangat diutamakan, karena itu adanya pemeriksaan, perawatan komponen mesin dan struktur pada kapal sangatlah penting. Kegagalan suatu komponen mesin dalam dalam kapal dapat menyebabkan kerugian. Oleh sebab itu diperlukan *check* dan *maintenance* untuk memastikan semua komponen mesin dalam kondisi prima.

Dalam memperbaiki armada kapalnya yang mengalami kerusakan dan berbagai kendala teknis, terdapat satu departemen dalam PT Meratus Line yang menangani hal tersebut, yakni Departemen Workshop Armada. Pada januari 2015 mesin kapal red reliance terpaksa masuk bengkel dikarenakan ada masalah pada mesin diesel nya. Mesin diesel yang bermasalah adalah mesin tipe MAN D2866 LE. Setelah diperiksa lebih lanjut, ternyata ada salah satu piston pada mesin tersebut yang mengalami patah. Piston tipe MAHLE tersebut mengalami patah setelah piston bekerja selama 5.000 jam. Padahal menurut ketentuan, piston seharusnya baru akan diperiksa secara berkala setiap 10.000 jam kerja. Hal ini tentunya menimbulkan pertanyaan mengenai kegagalan yang terjadi pada piston tersebut.

Banyak faktor yang dapat mempengaruhi terjadinya kegagalan pada piston ini meliputi kondisi lingkungan yang ekstrim, ketidaktepatan dalam pemilihan material, korosi, dan kesalahan pemasangan. Dari informasi kegagalan dan pengumpulan data mengenai piston, kemudian dilakukan analisa kegagalan material. Metode analisa yang dilakukan menggunakan dua metode yakni secara makro dan secara mikro.



1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam analisa kegagalan pada piston tipe MAHLE ini adalah :

1. Faktor apa yang menyebabkan kegagalan pada Piston MAHLE yang dipasang pada mesin MAN D2866 LE secara mekanik?
2. Bagaimanakah mekanisme kegagalan pada piston MAHLE yang dipasang pada mesin MAN D2866 LE secara mekanik?

1.3 Batasan Masalah

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

1. Material komponen piston tipe mahle yang dipasang pada mesin diesel tipe MAN D2866 LE adalah dalam keadaan gagal.
2. Desain dari piston memenuhi standar yang telah ditentukan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan analisa kegagalan piston MAHLE yang dipasang pada mesin MAN D2866 LE adalah :

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan pada piston MAHLE yang dipasang pada mesin MAN D2866 LE secara mekanik.
2. Menganalisa mekanisme kegagalan pada komponen piston MAHLE yang dipasang pada mesin MAN D2866 LE secara mekanik.



1.5 Manfaat Penelitian

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



(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)



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 D2866 ini sendiri memiliki 6 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 mesin diesel tipe ini bisa dilihat pada tabel 2.1.



Gambar 2.1 Mesin Diesel MAHLE D2866 (MAN,2012)

Tabel 2.1 Data teknik mesin diesel MAHLE D2866

Technical features D2866

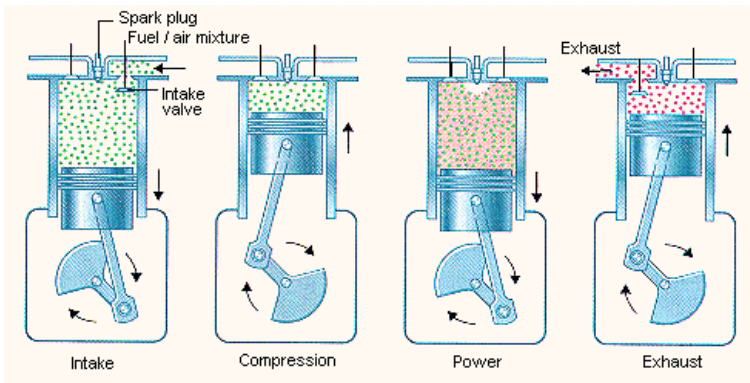
| Mode of operation | | ESP | | LTP | | PRP | | COP | |
|-------------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| at engine speed | rpm (Hz) | 1500 (50) | 1800 (60) | 1500 (50) | 1800 (60) | 1500 (50) | 1800 (60) | 1500 (50) | 1800 (60) |
| Engine version | | LE 203 | LE 203 | LE 201 | LE 201 | LE 201 | LE 201 | LE 201 | LE 201 |
| Bore | mm | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 | 128 |
| Stroke | mm | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 |
| Displacement | l | 11.9 | 11.9 | 11.9 | 11.9 | 11.9 | 11.9 | 11.9 | 11.9 |
| blocked ISO effective power ¹⁾ | kW | 360 | 400 | 308 | 354 | – | – | – | – |
| Torque | Nm | 2292 | 2122 | 1961 | 1879 | – | – | – | – |
| ISO standard power ²⁾³⁾ | kW | – | – | – | – | 280 | 322 | 180 | 220 |
| Torque | Nm | – | – | – | – | 1782 | 1708 | 1146 | 1167 |
| Net engine power output | kVA | 410 | 450 | 350 | 400 | 310 | 350 | 200 | 240 |

1) Time-limited continuous output that must not be exceeded (IFN).

2) Variable continuous output during PRP operation, can be exceeded by 10% for limited period (ICXN).

3) Variable continuous output during COP operation, can be exceeded by 10% (ICXN).

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 Piston

Piston merupakan salah satu komponen inti dalam mesin diesel yang memiliki tekanan paling tinggi. Prinsip kerja dari piston ini adalah mengubah energy translasi menjadi energy rotasi. Piston bertugas untuk mentransmisikan panas hasil pembakaran melalui *connecting rod*. Selain itu, piston juga membantu pada penyegelan silinder untuk mencegah keluarnya gas dari hasil proses pembakaran. Oleh karena itu piston harus cukup kuat untuk menjaga beban inersia pada bagian bagian nya agar resiko yang didapatkan menjadi kecil.



Gambar 2.3 Piston MAHLE pada mesin diesel D2866
(MAN,2012)

Cara kerja piston pada mesin diesel yakni menggunakan system *firing order* dimana hal ini tergantung dari jumlah silinder



pada mesin diesel dan bentuk dari *crankshaft*. Pengaturan *firing order* dirancang berdasarkan parameter-parameter berikut yang harus dipertimbangkan untuk suatu desain yang optimum, yaitu *engine vibrations*, *engine cooling*, dan *development of back pressure*. *Firing order* yang umum digunakan dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 *Firing Order* untuk mesin bersilinder jamak

| Jumlah Silinder | Firing Order |
|-----------------|-------------------------------|
| 3 | 1-3-2 dan 1-2-3 |
| 4 | 1-3-4-2 dan 1-2-4-3 |
| 6 | 1-4-2-6-3-5-6 dan 1-5-3-6-2-4 |
| 8 | 1-8-4-3-6-5-7-2 |

2.3 Aluminium

Karakteristik dari aluminium yang paling terkenal adalah ringan, berat jenisnya sekitar sepertiga dari baja paduan atau tembaga. Beberapa aluminium memiliki rasio perbandingan dari kekuatan dan berat yang lebih baik dibandingkan dengan baja yang berkekuatan tinggi. Aluminium memiliki *formability*, ketahanan korosi yang tinggi, serta konduktivitas listrik dan panas yang tinggi. Salah satu karakteristik yang paling penting dari aluminium adalah memiliki *machinability* dan *workability* yang baik (Avner, 1974).

Penunjukan temper pada aluminium mengikuti asosiasi aluminium dalam sistem penetapan penunjukan temper yang dilakukan sejak tahun 1948, dengan menambahkan tanda hubung. Hal ini digunakan untuk aluminium dan paduan aluminium yang didasarkan pada urutan perlakuan yang digunakan untuk berbagai temper (Avner, 1974).

Standar dari sistem penunjukan temper adalah diperlihatkan oleh huruf yang menunjukkan dasar dari temper yang diberikan. Terdapat empat dasar dari temper, yaitu : F untuk



fabrikasi, O untuk *annealed*, H untuk *strain-Hardened*, dan T untuk perlakuan panas (Avner, 1974).

- T2: *Annealed*
- T3: *Solution heat-treated* kemudian dilakukan *cold-worked*
- T4: *Solution heat-treated* dan *naturally aged*
- T5: *Artificially aged*
- T6: *Solution heat-treated* kemudian dilakukan *artificially aged*
- T7: *Solution heat-treated* kemudian dilakukan *stabilized*
- T8 : *Solution heat-treated, cold worked*, kemudian dilakukan *artificially aged*
- T9 : *Solution heat-treated, artificially aged*, kemudian dilakukan *cold worked*
- T10 : *Artificially aged* kemudian dilakukan *cold-worked* (hampir sama dengan T5, tetapi dilakukan *cold-worked* untuk meningkatkan kekuatan)

Secara garis besarnya aluminum digolongkan atas 2 kelas yaitu kelas aluminum tempa (*wrought aluminum*) dan Aluminum tuang (*cast alumiium*). Kedua kelas tersebut disusun berdasarkan standar *Aluminum Association* (AA). Khusus untuk jenis aluminum tuang, system penamaan aluminum berdasarkan standar AA dibagi lagi atas 8 kelas dimana kelas-kelas tersebut disusun berdasarkan unsur paduan utama yang digunakan. System tata nama ini menggunakan system 4 digit angka, seperti pada Tabel 2.3

Tabel 2.3 Klasifikasi Aluminum Tuang (*cast Aluminum*) sesuai standar AA

| Kelas | Unsur paduan utama |
|--------------|------------------------------------|
| 1xx.x | Aluminum murni (99,00% atau lebih) |
| 2xx.x | Al-Cu alloy |
| 3xx.x | Al-Si-Cu dan atau Mg |
| 4xx.x | Al-Si |
| 5xx.x | Al-Mg |



| | |
|-------|----------------------------|
| 7xx.x | Al-Zn |
| 8xx.x | Al-Sn |
| 9xx.x | Al dengan unsur-unsur lain |

Paduan Aluminium yang umum digunakan untuk *Sand Casting* antara lain (Surdia, 1999):

1. Paduan Aluminium-Tembaga
Kadar tembaga berkisar antara 4-10%. Unsur ini membuat paduan bersifat kuat dan keras. Paduan ini digunakan untuk pengecoran mesin, tempat poros engkol, ruang transmisi, dan lain-lain.
2. Paduan Aluminium-Silikon
Kadar Silikon hingga 5% dapat menaikkan karakteristik coran dan banyak menambah ketahanan korosi. Paduan ini digunakan untuk coran kebutuhan dalam air, pipa, alat masak, torak motor dan lain-lain.
3. Paduan Aluminium-Tembaga-Silikon
Unsur tembaga hingga 4% dan silikon hingga 3% dalam paduan ini memberikan kekuatan yang baik dan ketahanan korosi yang tinggi. Paduan ini digunakan dalam pengecoran yang membutuhkan tekanan yang ketat dan untuk bagian mesin mobil.
4. Paduan Aluminium-Magnesium
Kadar magnesium hingga 4% meningkatkan *machinability* dan ketahanan korosi, juga mengurangi berat komponen.
5. Paduan Aluminium-Tembaga-Magnesium-Nikel
Mengandung unsur Tembaga sekitar 3,5%, magnesium 1,5%, nikel 2%.



6. Paduan Aluminum-Mangan
Kadar mangan sekitar 1,5-2,5% memberikan sifat coran yang tahan kebocoran. Paduan tersebut digunakan pada tangki dan pipa.

Tabel 2.4 Standar Aluminum Forming (Yudy, 2008)

| Kelas | Paduan | Sifat |
|-------|----------|--------------------|
| 1000 | Al murni | Non Heat treatable |
| 3000 | Al-Mn | Non Heat treatable |
| 4000 | Al-Si | Non Heat treatable |
| 5000 | Al-Mg | Non Heat treatable |
| 2000 | Al-Cu | Heat treatable |
| 6000 | Al-Mg-Si | Heat treatable |
| 7000 | Al-Zn | Heat treatable |

2.4 Sifat Coran Paduan Aluminum

Aluminum banyak dipakai sebagai logam paduan daripada sebagai logam murni, sebab tidak kehilangan sifat ringan dan sifat mekanisnya dan mampu coranya diperbaiki dengan menambah unsur-unsur lain. Unsur-unsur paduan itu adalah tembaga, silikon, magnesium, mangan, nikel, dan sebagainya, yang dapat mengubah sifat-sifat paduan Aluminum (Surdia, 2006).

1. Paduan Aluminum-tembaga, Aluminum-tembaga-silikon

Paduan Aluminum-tembaga adalah paduan Aluminum yang mengandung tembaga 4,5%, memiliki sifat-sifat mekanik dan mampu mesin yang baik sedangkan mampu coranya agak jelek. Paduan Aluminum-tembaga-silikon dibuat dengan menambah 4-5% silikon pada paduan Aluminum-tembaga untuk memperbaiki mampu coranya, paduan ini disebut "lautal", adalah salah satu dari paduan Aluminum yang terutama.



2. .Paduan Aluminum-silikon, Aluminum-silikon-magnesium

Paduan eutektik dari Aluminum dan silikon sekitar 2% disebut silumin yang memiliki mampu cor yang baik, sehingga terutama dipakai untuk bagian-bagian mesin biasa. Tetapi paduan yang biasa dicor mempunyai sifat mekanik yang buruk karena butir-butir silikon yang besar, sehingga ia dicor dengan tambahan natrium dan agitasi dari logam cair untuk membuat kristal halus dan memperbaiki sifat-sifat mekanik. Tapi cara ini tidak efektif untuk coran tebal.

3. Paduan Aluminum-magnesium

Paduan Aluminum yang mengandung magnesium sekitar 4% atau 10% mempunyai ketahanan korosi dan sifat-sifat mekanik yang baik. Ia mempunyai kekuatan tarik di atas 30 kgf/mm² dan perpanjangan di atas 12% setelah perlakuan panas. Paduan ini disebut hidronalium dan dipakai untuk bagian-bagian dari alat-alat industri kimia, kapal laut, kapal terbang, dan sebagainya, yang membutuhkan ketahanan korosi.

4. Paduan Aluminum tahan panas

Paduan Y ialah paduan Al-Cu-Ni-Mg yang kekuatannya tidak berubah sampai 200°C dan sangat tinggi walaupun pada temperatur 300°C, sehingga paduan ini dipergunakan untuk torak atau tutup silinder. Lo-Ex adalah paduan Al-Si-Cu-Ni-Mg, yang mempunyai koefisien muai rendah dan kekuatan panasnya tinggi, sehingga ia dipakai untuk torak dan sebangsanya.

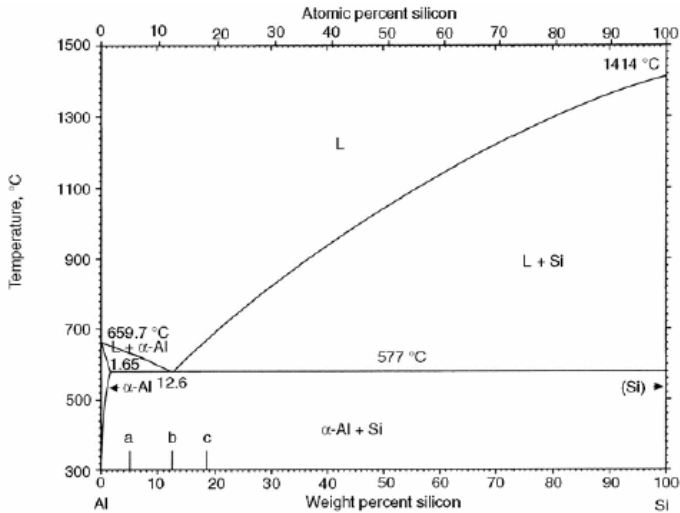
2.5 Paduan Aluminum-Silikon (Al-Si)

Aluminum paduan dengan silikon sebagai unsur paduan utama adalah kelas paduan yang mempunyai mampu cor yang baik hingga penggunaanya hampir mencapai 90% dari total pengecoran Aluminum (Zotolorovsky, 2007). Hal ini disebabkan oleh pengaruh dari silikon dalam memperbaiki karakteristik



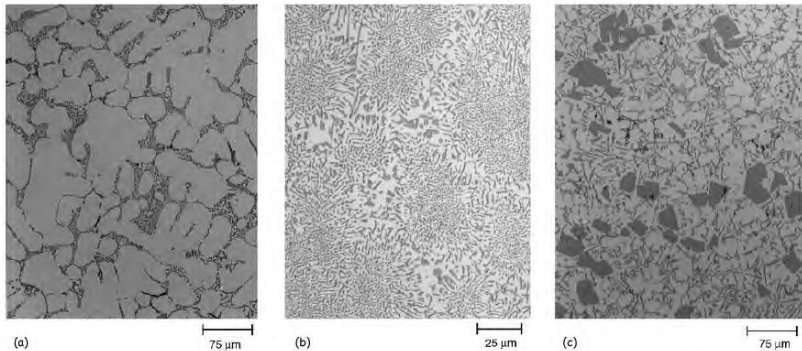
pengecoran Aluminium, yang dikombinasikan dengan peningkatan sifat mekanik dan ketahanan korosi. Penambahan kandungan silikon juga akan meningkatkan nilai kekerasan paduan Al-Si. Peningkatan oleh fluiditas logam cair yang semakin baik seiring dengan penambahan jumlah kandungan silikon. Sebagai tambahan, paduan ini mempunyai permukaan yang bagus sekali, tanpa kegetasan panas, sangat baik untuk paduan coran, sangat ringan, koefisien pemuaian yang kecil dan sebagai penghantar yang baik untuk listrik dan panas. Karena memiliki kelebihan yang mencolok, paduan ini sangat banyak dipakai (Surdia, 1999).

Paduan Aluminium-silikon digunakan secara luas di bidang otomotif khususnya piston karena memiliki ketahanan aus dan korosi yang baik, koefisien ekspansi termal yang rendah dan memiliki rasio kekuatan dan berat yang tinggi. Paduan Aluminium yang diperuntukkan untuk ketahanan aus merupakan paduan Aluminium dengan dasar system paduan Aluminium-silikon. Sistem biner ini merupakan system paduan eutektik sederhana dengan komposisi eutektik pada 12,4% berat Si. Pada temperatur kamar, paduan hipoeutektik mengandung fase Aluminium primer yang lunak dan ulet serta mengandung fase silikon yang keras dan getas sesuai dengan reaksi eutektik. Fase silikon inilah yang memberikan kontribusi terhadap ketahanan aus yang baik bagi paduan ini (Davis, 2001).



Gambar 2.4 Diagram Fasa Paduan Aluminum-Silikon (Warmuzek, 2004)

Paduan Al-Si Hipereutektik merupakan paduan yang paling banyak dipakai untuk keperluan ketahanan aus (*wear resistant*) mengandung partikel silikon primer berukuran besar (*coarse*) dan bersudut (*angular*) disamping juga mengandung eutektik silikon. Partikel silikon primer ini menghasilkan ketahanan aus yang amat baik bagi paduan ini (Harun, 1994).



Gambar 2.5 Mikrostruktur Paduan cor Aluminium-Silikon Komersial. (a) Mikrostruktur Paduan Hypoeutektik Sand Cast (1,65-12,6 wt% Si). (b) Mikrostruktur Paduan Eutektik Permanent Mold (12,6% Si). (c) Mikrostruktur Paduan Hypereutektik Die Cast (>12,6% Si) (Warmuzek, 2004)

Selama pembekuan, dendrit-dendrit Aluminium hampir murni membeku pertama kali. Aluminium-silikon eutektik akan mengisi ruang kosong antar dendrite. Ketika eutektik membeku, eutektik akan terurai menjadi Aluminium hampir murni dan silikon. Seiring bertambahnya kecepatan pembekuan, sel-sel dendrite menjadi kecil. Terlihat pada **Gambar 2.5**, paduan hypoeutektik dengan produksi sand cast (a) menghasilkan sel-sel dendrite yang besar dari pendinginan lambat selama pembekuan. Paduan dengan permanent mold (b) dengan pendinginan cepat menghasilkan ukuran sel dendrite yang lebih kecil. Dan paduan dengan die casting (c) dimana dengan pendinginan yang sangat cepat menghasilkan ukuran sel dendrite yang sangat kecil (Smith, 1993).

2.6 Silikon

Silikon (Si) merupakan unsur kedua terbanyak setelah oksigen (O) dalam kerak bumi dan Si juga berada dalam jumlah yang banyak pada setiap tanah. Porsi terbesar Si tanah dijumpai



dalam bentuk kuarsa atau kristal silikon (Buol et. al., 1980). Pada umumnya tanah mengandung 5-40% Si (Kovda, 1973). Dalam setiap kilogram tanah liat terkandung sekitar 200-320 gram Si, sementara dalam tanah berpasir terdapat antara 450-480 gram Si (Kovda, 1973). Si merupakan unsur yang *inert* (sangat tidak larut) sehingga selama ini Si dianggap tidak memiliki arti penting bagi proses-proses biokimia dan kimia. Juga, karena jumlahnya yang melimpah dalam tanah peran Si seringkali tidak terlalu diperhatikan atau bahkan tidak teramati.

Silikon pada paduan Aluminium memiliki efek yang besar pada proses pengecorannya. Efek dari penambahan silikon ini adalah meningkatkan fluiditas, hot tear resistance, komposisi silikon pada paduan Aluminium adalah 30% yang dimana mencapai range hypoeutectoid dan hypoeutectic. silikon juga berperan besar pada fluiditas silikon yang dimana ketika fluiditas tinggi maka semakin mudah untuk mengecor cor-coran yang kompleks (J.G.Kaufmann, 2011).

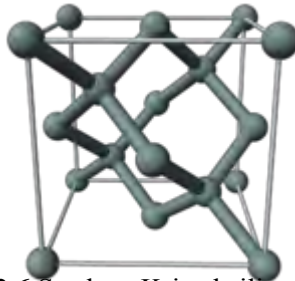
Tabel 2.5 Sifat Fisik dan Mekanik Silikon (William C. O'Mara, 1990)

| Si Properties | |
|----------------------|-----------------------------|
| Density | 2,3291 g/cm ³ |
| Melting Point | 1420 °C |
| Molecular Weight | 28.086 |
| Thermal Conductivity | 1,63 W/(cm K); 1,4 W/(cm K) |
| Thermal Expansion | 4,05 x 10 ⁻⁶ / K |
| Young's Modulus | 131 GPa |
| Shear Modulus | 79,9 GPa |
| Bulk Modulus | 102 GPa |
| Hardness | 1150 (Mohs 7) |

Silikon sebagai paduan utama pada beberapa pengecoran logam mempunyai mampu cor yang baik, hal ini disebabkan oleh



pengaruh dari silikon dalam memperbaiki karakteristik pengecoran yang dikombinasikan dengan sifat mekanik dan ketahanan korosi (Zotolorovsky, 2007). Silicon mempunyai struktur kristal *diamond cubic*.



Gambar 2.6 Struktur Kristal silicon (diamond cubic)(Callister,2007)

2.7 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan merupakan pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut. Jadi tujuan utama dari analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan serta memberikan solusi-solusi yang dapat dilaksanakan untuk menanggulangi masalah kegagalan tersebut.

Dengan kata lain, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makroskopis dan mikroskopis harus dilaksanakan secara bertahap. Selain itu pengujian mekanik juga diperlukan karena secara umum



kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brooks,2002). Faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan :

1.Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.6 dibawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material.

Tabel 2.6 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin

| Permasalahan | % |
|------------------------------------------|----------|
| Kesalahan pemilihan material | 38 |
| Cacat produksi | 15 |
| Kesalahan perlakuan panas | 15 |
| Kesalahan desain mekanik | 11 |
| Kondisi operasi yang berlebihan | 8 |
| Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol | 6 |
| Pemeriksaan yang kurang baik | 5 |
| Material yang tidak jelas | 2 |

2.Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.7 menunjukan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2.7 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin

| Permasalahan | % |
|----------------------------|----------|
| Perawatan yang kurang baik | 44 |



| | |
|---------------------------|----|
| Cacat saat fabrikasi | 17 |
| Defisiensi desain | 16 |
| Pemakaian yang abnormal | 10 |
| Cacat material | 7 |
| Penyebab yang tidak jelas | 6 |

3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

1. Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material
2. Kegagalan getas akibat beban kejut
3. Kegagalan pada temperature tinggi (pemuluran)
4. *Static delayed fracture*
5. Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan
6. Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*
7. Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

4. Kondisi kerja yang ekstrim

Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin

| Penyebab Kegagalan | % |
|---------------------------------------------|----|
| Korosi | 29 |
| Kelelahan (<i>fatigue</i>) | 25 |
| Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>) | 16 |
| Kelebihan beban | 11 |
| Korosi temperature tinggi | 7 |
| Korosi retak tegang, korosi lelah, | 6 |



| | |
|----------------------------|---|
| pengetasan hydrogen | |
| Pemuluran (<i>creep</i>) | 3 |
| Abrasi, Erosi | 3 |

2.8 Prosedur dalam Analisa Kegagalan

Ketika terjadi sebuah kegagalan atau retak, perlu dilakukan suatu tindakan untuk mencegah terjadinya kegagalan yang sama dengan menginvestigasi dan menganalisa kegagalan komponen yang terjadi. Adapun tindakan yang perlu dilakukan dalam menginvestigasi komponen yaitu (Nishida, Shin-ichi, 1992):

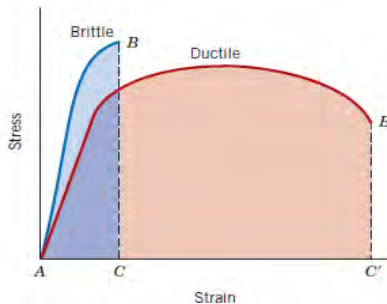
1. Material yang digunakan
 - a. Data produksi : *melting, rolling, forming, casting, heat treatment*, dan proses *machining*
 - b. Analisa kimia : pengujian X-Ray, komposisi kimia
 - c. Sifat mekanik : *tensile, bending, hardness, impact*, dan *fatigue test*.
 - d. Struktur metalurgi : struktur makro dan mikro struktur
 - e. Pengerasan permukaan dan tegangan sisa ; *finishing*
 - f. Patah permukaan
2. Desain tegangan dan kondisi perawatan
 - a. Kekuatan dari luar : golongan, besar, pengulangan.
 - b. Atmospher : udara, air, air laut, dan sebagainya
 - c. Yang lain : kondisi perbaikan
3. Uji percobaan
 - a. Uji laboratorium : perhitungan tegangan (kekuatan material, *finite element method* (FEM), kekuatan leleh, kekerasan patahan.
 - b. Konfirmasi uji lapangan : ukuran tegangan, uji produksi.
4. Hasil uji seluruhnya.

2.9 Jenis Patahan

Patahan adalah terbaginya spesimen dari sebuah benda menjadi 2 atau lebih potongan karena terjadinya tegangan statik



dan pada temperature yang relatif rendah terhadap titik leleh dari suatu material. Tegangan yang terjadi pada material bisa merupakan tegangan tarik, tegangan kompresi, tegangan geser ataupun torsi. 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 2.7 ditunjukkan diagram tegangan dan regangan dari patahan ulet dan getas.



Gambar 2.7 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.

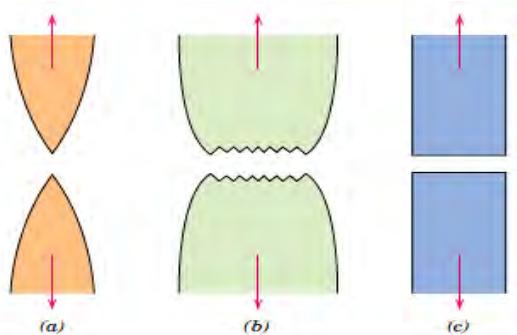
a. Patah Ulet

Bentuk patahan ulet memiliki karakteristik yang berbeda jika diamati secara makroskopis. Pada Gambar 2.8 ditunjukkan

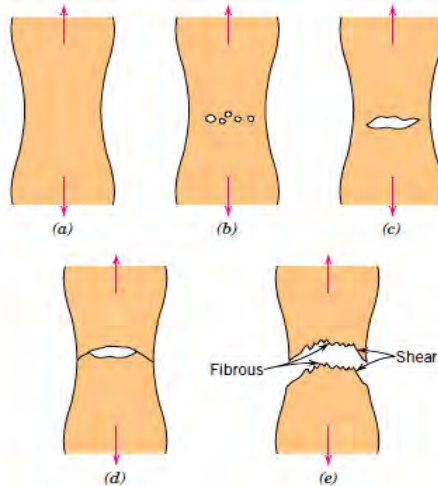


skematik representative dari dua karakteristik profil patahan secara makro. Konfigurasi yang ditunjukkan oleh Gambar 2.8 (a) ditemukan pada material lunak seperti emas pada temperature ruang dan metal, polimer dan inorganik gelas pada temperature yang relatif tinggi.

Secara umum profil patahan material ulet akibat tegangan tarik ditunjukkan pada Gambar 2.8(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 2.9.



Gambar 2.8 a) bentuk patahan ulet, (b) bentuk patahan ulet setelah terjadi *necking*, (c) bentuk patahan getas tanpa terjadi deformasi plastis (Callister,2007)



Gambar 2.9 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 2.10 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

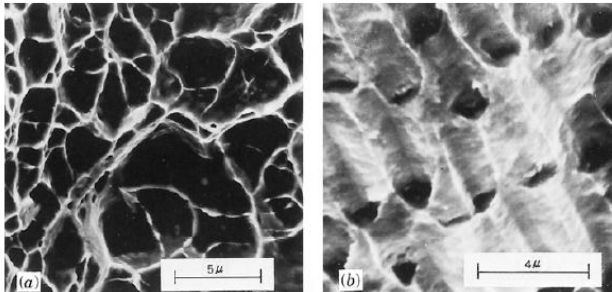


pengujian dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Studi mengenai tipe patahan disebut *fractographic*. *Scanning Electron Microscope* (SEM) lebih banyak digunakan dalam mengamati bentuk crack, patahan karena mempunyai resolusi dan kedalaman observasi yang lebih tinggi darimikroskopik optik. Gambar 2.10 menunjukkan patah ulet *cup* dan *cone* dan perbedaan patah getas pada *mild steel*.



Gambar 2.10 a) patah ulet (*cup and cone*) pada aluminium.(b)patah getas pada *mild steel* (Wulpi,1999)

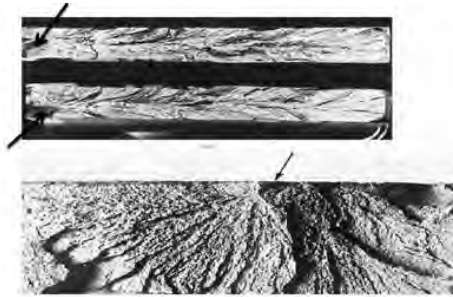
Pada skala makro, patah ulet ditunjukkan dengan adanya perubahan ketinggian yang nyata sepanjang penampang potongan melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*.Kemudian pada skala mikro, patah ulet ditandai dengan adanya profil *dimple* pada permukaan patahnya yang disebabkan oleh penjalaran retakan mikro (*microvoids coalescence*) pada gambar 2.11.



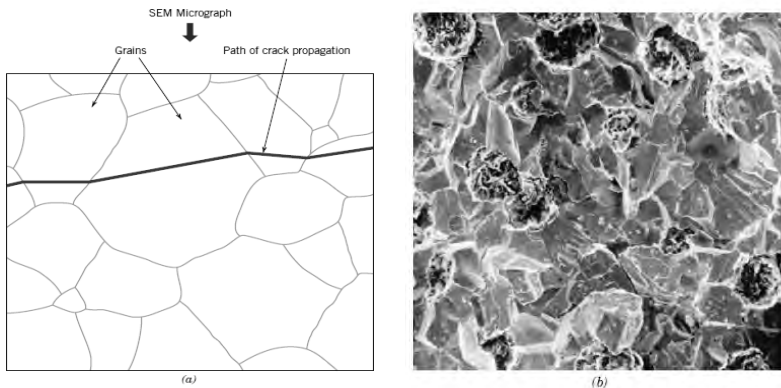
Gambar 2.11 : (a) SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik, patahan hasil beban tarik *uniaux*, 3300x. (b) SEM yang menunjukkan *spherical dimple* karakteristik hasil beban geser, 5000x (Callister, 2007)

b. Patah Getas

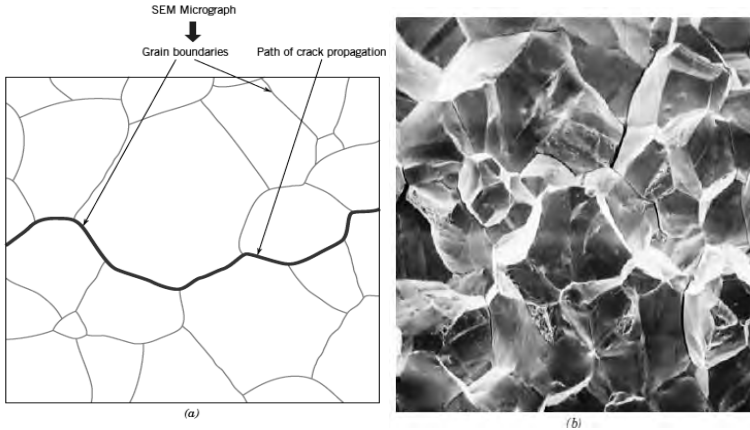
Patah getas sering terjadi tanpa adanya atau sedikit sekali terjadi deformasi plastis pada material. Retak/ patahan merambat sepanjang bidang-bidang kristalin yang membelah atom-atom material (*transgranular*). Kemudian pada material lunak dengan butir kasar (*coarse grain*) maka dapat dilihat pola-pola yang dinamakan *chevron* seperti Gambar 2.12 (a) atau patah getas permukaan terlihat garis atau daerah asal retakan disebut *fan pattern* seperti pada Gambar 2.12(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 2.13 dan 2.14.



Gambar 2.12: (a) Foto yang menunjukkan bentuk V “chevron” sebagai karakteristik patah getas. (b) Foto yang menunjukkan permukaan patah getas daerah asal retakan. (Callister,2007)



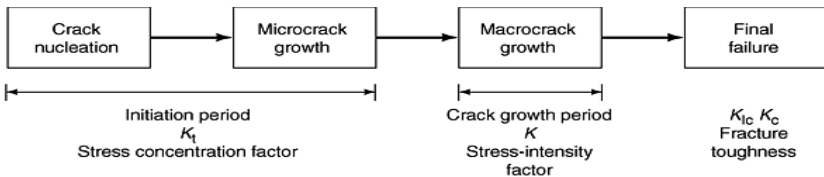
Gambar 2.13: (a) skema perambatan retak yang melewati butir (*transgranular*) (b) hasil SEM dari patah secara transgranular (Callister,2007)



Gambar 2.14: (a) skema perambatan retak yang terjadi sepanjang batas butir (*intergranular*) (b) hasil SEM dari patah secara *intergranular* (Callister,2007)

2.10 Mekanisme Pembentukan Patah Lelah

Kelelahan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahap yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjaralan 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 2.17 dibawah ini



Gambar 2.15 Mekanisme patah lelah dan faktornya (ASM Handbook Vol.19 *Fatigue and Fracture*,2002)

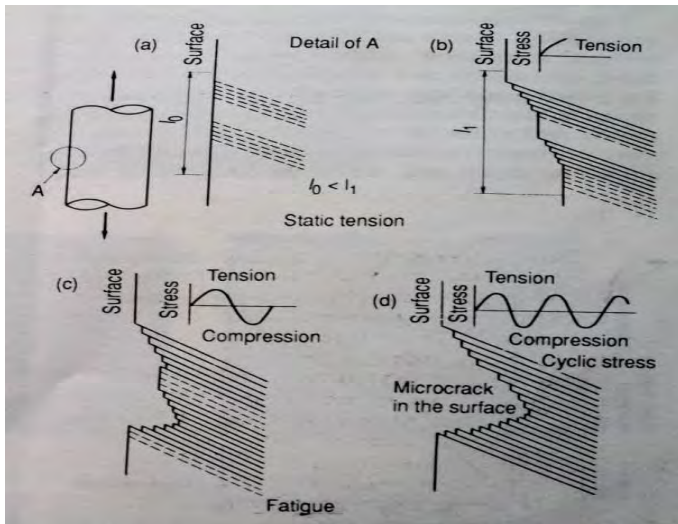


Menurut Schijve, terdapat 5 fase yang selama proses *fatigue*, yaitu : (ASM Handbook Committee Volume 19, 2002):

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 2.18.



Gambar 2.16 Model Wood untuk penginitian 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*).

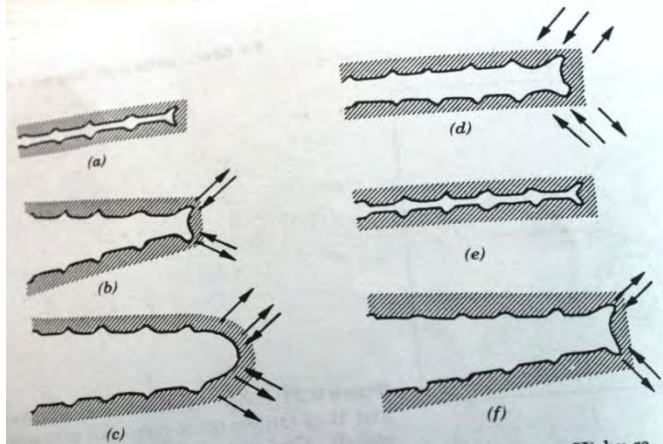
b) Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

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 menjangar 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 2.19 dibawah ini.



Gambar 2.17 Mekanisme penumpulan ujung retakan secara plastis (a) beban nol (b) beban tarik kecil (c) beban tarik maksimum (d) beban-tekan kecil (e) beban tekan maksimum (f) beban tarik kecil (Callister,2007)

2.11 Karakteristik Patahan

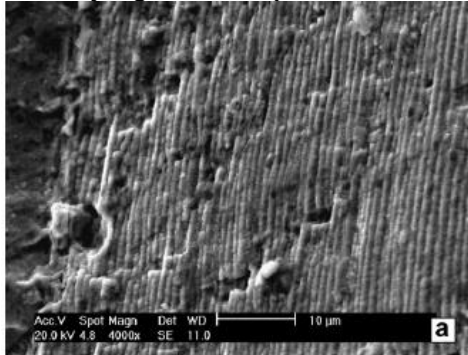
Klasifikasi dasar dari proses patah bila ditinjau dari modus dan penyebabnya adalah patah ulet, patah getas, patahlelah



(*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* (Gambar 2.15). Profil *beachmarks* dan striasi ini merupakan hasil dari fluktuasi beban yang diberikan pada benda.



Gambar 2.18 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

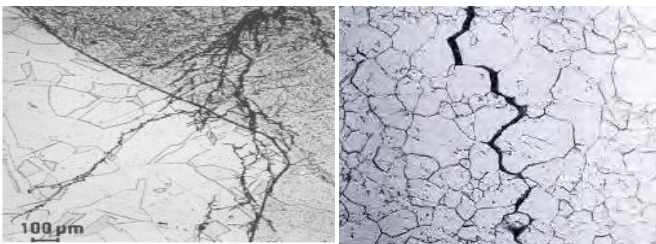


melintang dari benda, biasa dikenal dengan istilah *shear lips*. Kemudian pola patah getas ditunjukkan dengan permukaan patahan yang datar dan tegak lurus terhadap arah beban, serta tanpa adanya petunjuk bahwa telah terjadi deformasi plastis sebelum benda mengalami patah. Selain kedua karakteristik diatas, 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. Contoh ciri patah ulet ditunjukkan pada Gambar 2.8.

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 penjarangan 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 2.16 (a)
- Patahan melewati batas butir atau patah intergranular, dikenal dengan nama *intergranular embrittlement*, ditunjukkan pada Gambar 2.16 (b)



Gambar 2.19: Retakan dengan pola rambatan (a) Transgranular
(b) Intergranular (Colangelo, 1989)



2.12 Penelitian Sebelumnya

1. F.S Silva (2005) dalam penelitiannya mengenai *fatigue on engine pistons* menyatakan bahwa penyebab *fatigue* pada piston dikarenakan reduksi konsumsi bahan bakar dan kenaikan daya yang akan mengurangi berat piston. Hal ini menyebabkan menipisnya dinding piston sehingga *stress* yang diterima menjadi lebih besar.

2. D. Casellas, R. Perez, J.M. Prado (2005) dalam penelitiannya yang berjudul *Fatigue Variability in Al-Si cast alloys* menyebutkan bahwa mekanisme *fatigue* pada paduan Al-Si disebabkan karena adanya distribusi ukuran pori dan pertumbuhan retak sesuai dengan daerah penyebaran retak secara mikro.



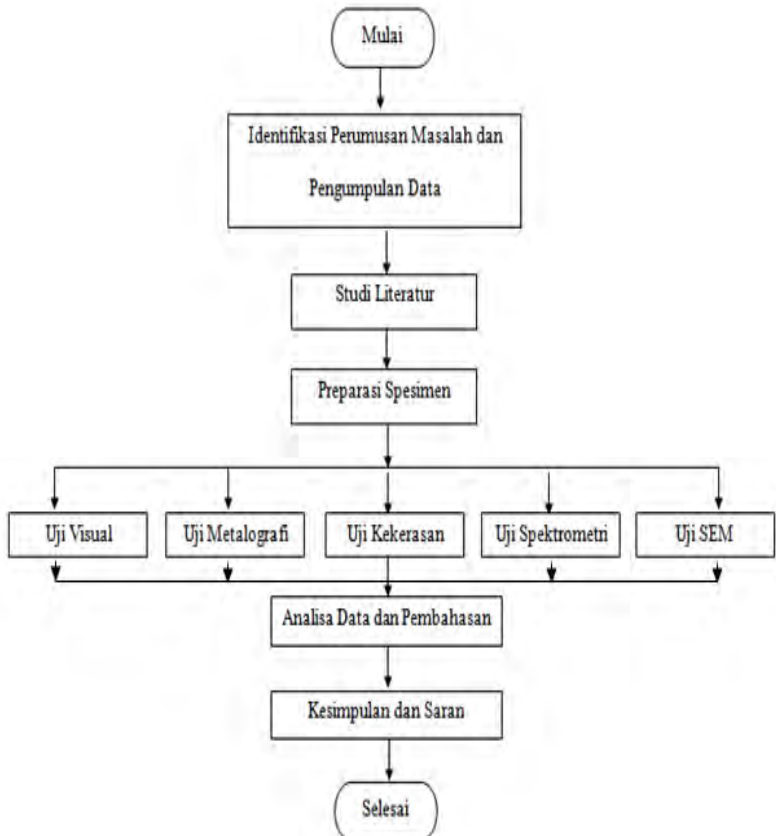
(Halaman Ini Sengaja dikosongkan)



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 literature, 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 Piston 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 yakni Piston tipe mahle yang digunakan pada *auxiliary engine* mesin MAN D 2866 LE kapal Meratus Red Reliance PT. Meratus Line Surabaya yang telah mengalami patah pada januari 2015



diperlihatkan pada gambar 3.2. Spesifikasi dimensi piston ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi dimensi Piston tipe MAHLE.

| Dimensi | Tinggi (mm) | Diameter (mm) | Diameter pin (mm) | Jarak pin dari kepala (mm) |
|----------------|------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------|
| | 130 | 127,86 | 46 | 58 |



Gambar 3.2 Piston Mahle 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

3.4.1 Bahan 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 Data dan Komponen

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 Piston tipe Mahle sebagai data awal penelitian. Data ini diperlukan sebagai pendukung dalam proses analisa kegagalan pada pecahnya piston yang meliputi dimensi piston, desain piston, dan data operasi.

3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap persiapan specimen diperlukan sebelum specimen diuji untuk menentukan penyebab terjadinya kegagalan material pada piston. 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 dan mikroskop stereo.

Adapun perlakuan yang dilakukan terhadap sampel material adalah dengan cara mengambil fotografi dengan kamera digital yang bertujuan untuk mendapatkan informasi bentuk kegagalan yang terjadi secara makro dan menggunakan *stereomicroscope* dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan profil makronya.



Gambar 3.3 Kamera dan mikroskop stereo

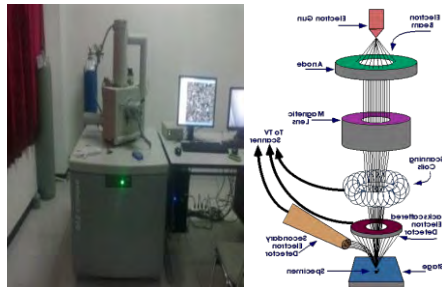
3.5.4 Pengamatan Mikroskopik

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 Piston 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 HNO₃ 2%)
2. Tahap pengamatan



- Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro spesimen dengan mikroskop optik dengan beberapa kali perbesaran.



Gambar 3. 5 Mikroskop optik *Olympus BX51M-RF*

3.5.7 Pengujian Kekerasan Brinell

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode Brinell dimana dalam pengujiannya memakai indenter bola baja, pembebanan sebesar 62.5 kgf dan waktu indentasi selama 10 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Mterial dan Metalurgi, ITS.



Gambar 3.6 Mesin uji kekerasan brinell

3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.2 Rancangan penelitian specimen

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



(halaman ini sengaja dkosongkan)



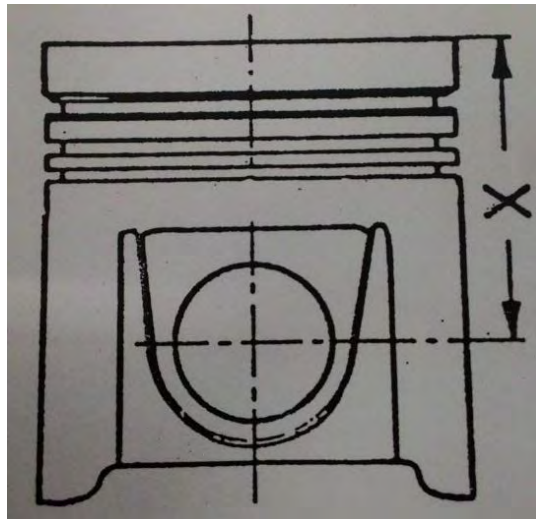
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 ANALISA DATA

4.1.1 Record Piston

Kapal Meratus Red Reliance milik PT Meratus Line pada bulan januari 2015 diharuskan untuk memperbaiki mesin diesel tipe MAN D2866 LE dikarenakan ada masalah. Masalah tersebut muncul karena adanya piston yang mengalami pecah. Piston pecah menjadi dua bagian setelah bekerja selama 5.000 jam. Padahal menurut operator, pemeriksaan dan proses maintenance pada piston seharusnya dilakukan setiap 10.000 jam kerja. Piston ini menggunakan material paduan aluminium dan silikon.

Berikut adalah data data piston tipe MAHLE mencakup spesifikasi piston yang diperlihatkan pada gambar 4.1 dan tabel 4.1.



Gambar 4.1 Gambar Design Piston MAHLE

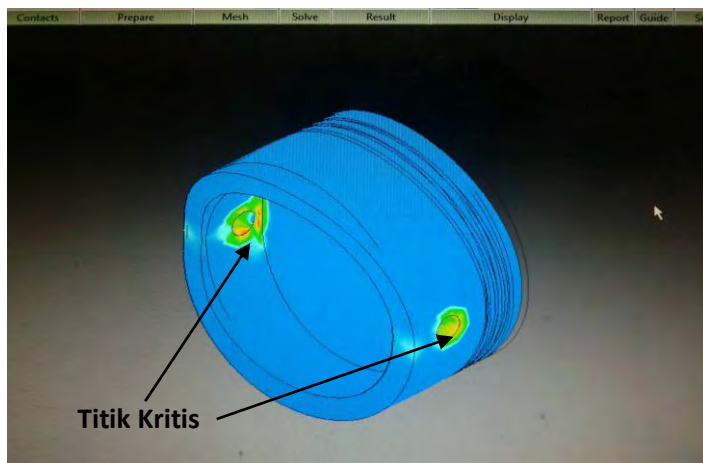


Tabel 4.1 Spesifikasi Dimensi Piston

| Dimensi | Tinggi (mm) | Diameter (mm) | Diameter pin (mm) | Jarak pin dari kepala (mm) |
|---------|-------------|---------------|-------------------|----------------------------|
| | 130 | 127,86 | 46 | 58 |

4.1.2 Analisa Titik Kritis

Pada gambar 4.2 merupakan simulasi gambar piston yang telah dimodelkan. Pada gambar terlihat bahwa pembebanan pada piston terpusat pada bagian pin piston dimana pada bagian tersebut digunakan sebagai tumpuan dari connecting rod untuk melakukan kerja. Oleh karena itu pada daerah ini muncul warna merah yang berarti merupakan titik kritis. Pembebanan yang diterima piston adalah pembebanan geser dan dorong yang berasal dari connecting rod . oleh sebab itu diinisiasi munculnya daerah awal retakan yakni pada daerah pin piston.



Gambar 4.2 Hasil simulasi pemberian beban pada piston menggunakan Software Inventor



4.1.3 Hasil 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 4.2

Tabel 4.2 Data Hasil Uji Komposisi

| Unsur | Kandungan (%) |
|-------|---------------|
| Al | 85.3 |
| Si | 11.3 |
| Fe | 0.441 |
| Cu | 1.12 |
| Mn | 0.0898 |
| Mg | 0.561 |
| Zn | 0.062 |
| Cr | 0.0002 |
| Ni | 0.887 |

Berdasarkan hasil pengujian komposisi pada komponen piston Al-Si diketahui bahwa kandungan unsur yang banyak dipakai yaitu AL 85% dan Si 11.3%.

Dari data tersebut, bisa disimpulkan bahwa fasa yang terbentuk adalah fasa hipoeutektik dikarenakan pada piston ini mengandung 11,3% Si. Berdasarkan data ASM internasional (2004), dalam paduan Al-Si terdapat 3 fasa yang terjadi yaitu :

1. Hipoeutektik dengan kandungan silikon < 12%
2. Eutektik dengan kandungan silikon 12,2% sampai 12.6%
3. Hipereutektik dengan kandungan silikon >12.6%

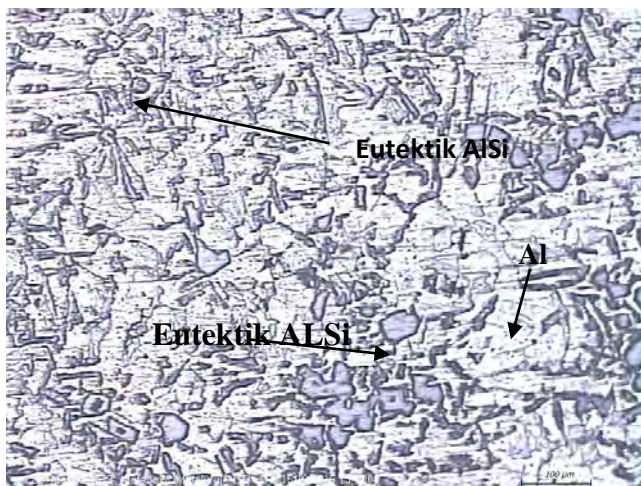
Selain mempengaruhi fasa yang terjadi, konsentrasi silikon meminimalkan ekspansi termal sekaligus meningkatkan termal konduktifitas (S.Krono, 2008) sehingga meningkatkan



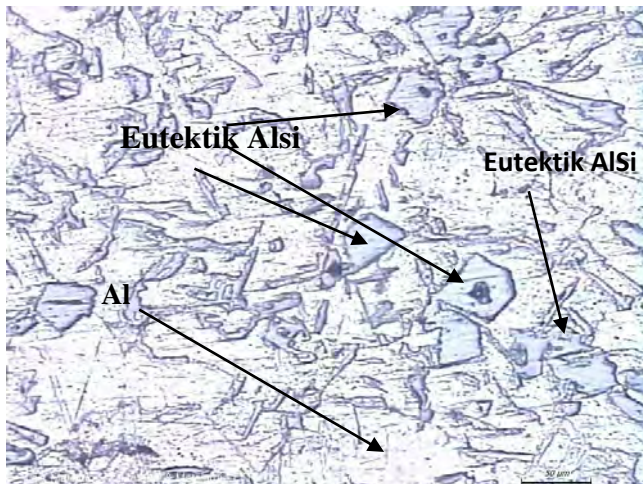
kinerja piston. Jadi tidak menyebabkan terjadinya kegagalan pada suatu material aluminium.

4.1.4 Hasil Pengujian Metalografi

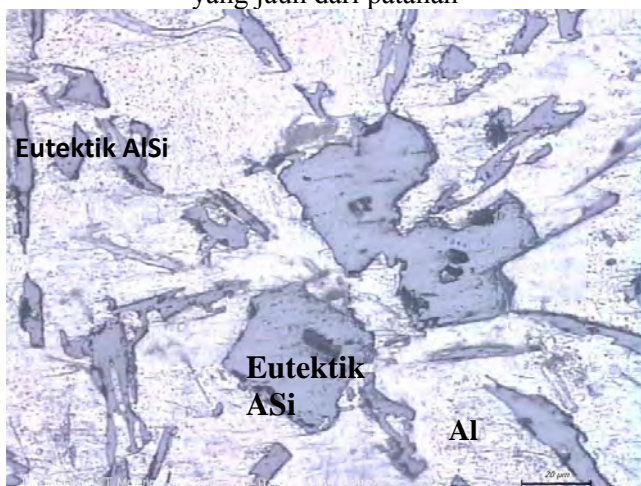
Pengujian struktur mikro ini dilakukan pada daerah yang jauh dari patahan dan yang dekat dari patahan. Sehingga dapat diamati apakah material mengalami perubahan fasa yang menyebabkan berubahnya sifat dari material tersebut yang memicu terjadinya kegagalan. Pengamatan yang dilakukan dengan perbesaran 100x sampai dengan 500x dengan menggunakan alat mikroskop optik.



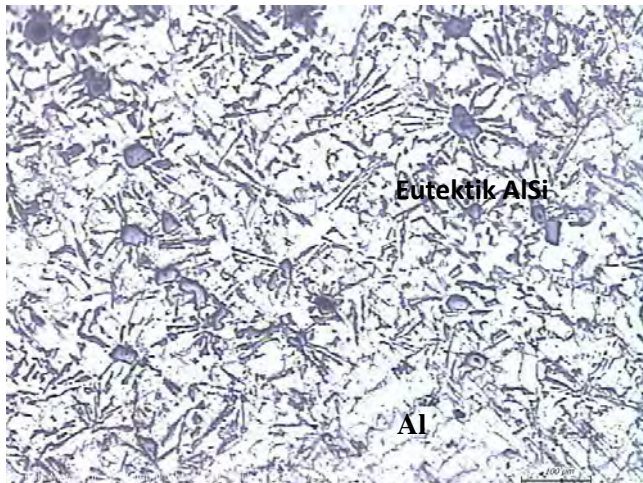
Gambar 4.3 Struktur mikro AlSi perbesaran 100x pada material yang jauh dari patahan



Gambar 4.4 Struktur mikro AlSi perbesaran 200x pada material yang jauh dari patahan



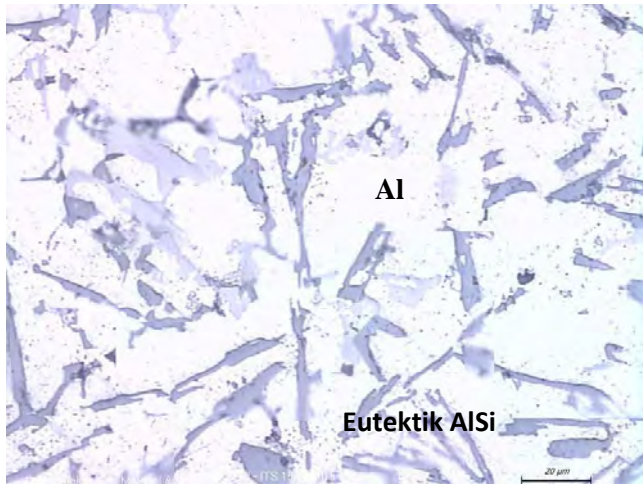
Gambar 4.5 Struktur mikro AlSi perbesaran 500x pada material yang jauh dari patahan



Gambar 4.6 Struktur mikro AlSi perbesaran 100x pada material yang dekat dari patahan



Gambar 4.7 Struktur mikro AlSi perbesaran 200x pada material yang dekat dari patahan



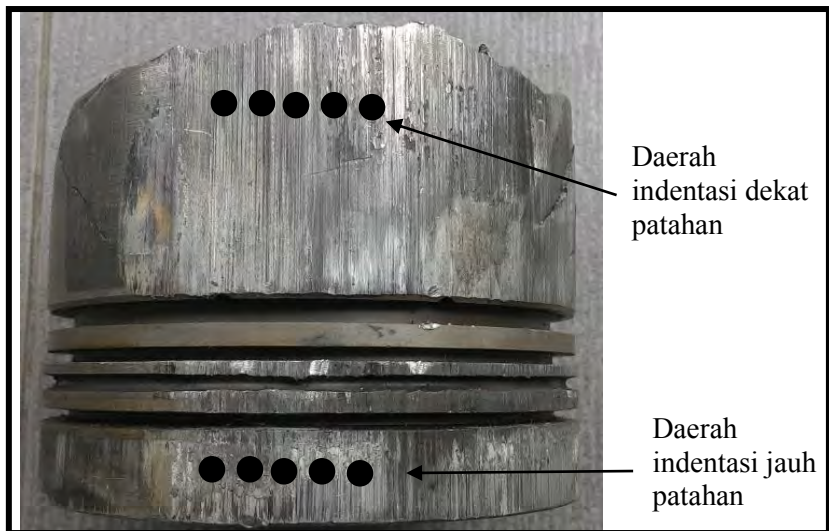
Gambar 4.8 Struktur mikro AlSi perbesaran 500x pada material yang dekat dari patahan

Berdasarkan pengamatan foto struktur mikro pada piston diatas, didapatkan bahwa pada bagian yang berwarna putih adalah matriks aluminium yang merupakan unsur utama pembentuk piston Al-Si. Dan untuk bagian yang berwarna abu abu merupakan fasa eutektik AlSi. Pada daerah yang jauh dari patahan, penyebaran fasa eutektik AlSi tidak tersebar merata dan berukuran tidak seragam. Hal ini bereda dengan daerah yang dekat dengan patahan. Pada daerah ini terlihat bahwa penyebaran fasa eutektik lebi merata dan ukurannya pun seragam. Banyaknya eutektik yang menyebar pada daerah yang dekat dengan patahan menyebabkan paduan ini menjadi lebih keras dibandingkan dengan daerah yang jauh dari patahan. Karena sifat paduan dari unsure silikon yang mengikat aluminium pada fasa eutektik AlSi ini berpengaruh pada naiknya kekerasan kompen piston MAHLE ini.



4.1.5 Hasil Pengujian Kekerasan Brinell

Pengujian hardness ini digunakan untuk mengetahui distribusi kekerasan pada piston yang mengalami kegagalan dan yang berada jauh dari kegagalan diperlihatkan pada gambar 4.9. Pengujian ini menggunakan indentasi sebanyak 5 titik, indentasi dilakukan pada daerah yang dekat dan jauh dari patahan dengan beban sebesar 60kgf. Pembagian daerah indentasi dapat dilihat pada gambar 4.9



Gambar 4.9 Pembagian daerah indentasi uji kekerasan brinell

Pada tabel 4.3 diperlihatkan nilai kekerasan yang didapatkan pada daerah patahan dan yang jauh dari patahan, serta grafik distribusi kekerasan.

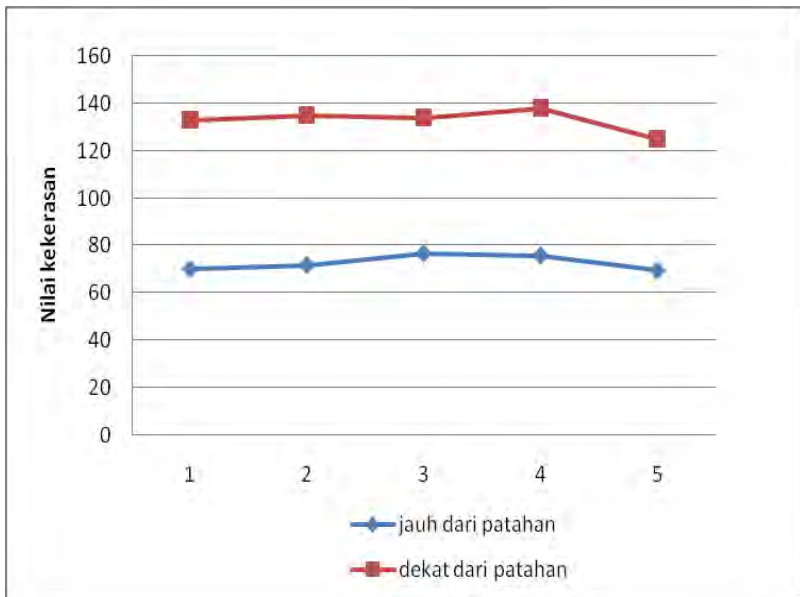
Dari gambar grafik 4.10 bisa terlihat bahwa nilai kekerasan di daerah yang jauh dari patahan memiliki rata-rata sebesar 72.84 BHN, sedangkan yang dekat dengan patahan memiliki nilai rata-rata sebesar 133 BHN. Dari sini bisa dilihat bahwa komponen ini mengalami kenaikan kekerasan pada daerah



yang mengalami patahan bila dibandingkan dengan daerah yang berada jauh dari patahan. Dari data ini didapatkan bahwa kekerasan mengalami kenaikan sebesar 360.16 BHN pada daerah yang dekat dengan patahan dibandingkan dengan yang jauh dari patahan.

Tabel 4.3 Data Hasil Pengujian Kekerasan

| BHN | | |
|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Daerah Indentasi | Pada daerah yang jauh patahan | Pada daerah yang dekat patahan |
| <i>1</i> | 70.2 | 133 |
| <i>2</i> | 71.8 | 135 |
| <i>3</i> | 76.7 | 134 |
| <i>4</i> | 75.9 | 138 |
| <i>5</i> | 69.6 | 125 |
| <i>Average</i> | 72.84 | 133 |



Gambar 4.10 Grafik distribusi kekerasan pada piston.

4.1.6 Hasil Pengujian Fraktografi



Gambar 4.11 Pembagian daerah patahan pada piston

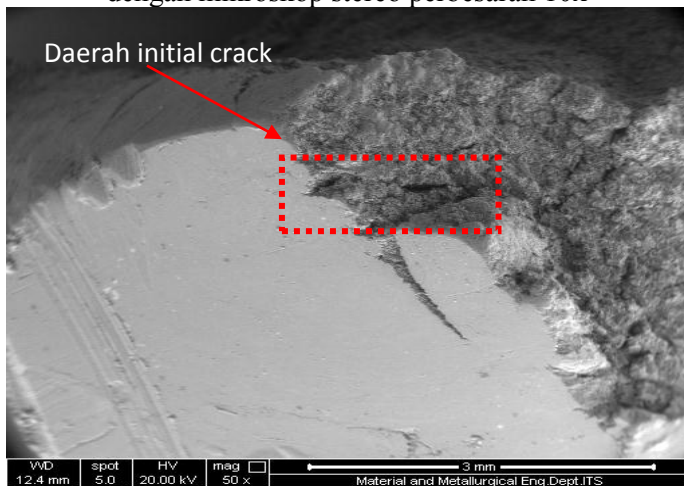


Dari hasil pengamatan visual secara makro menggunakan kamera pada daerah komponen piston yang mengalami kerusakan pada gambar 4.11, didapat gambar patahan yang terlihat. Terlihat kegagalan pada piston ini terjadi pada daerah pin piston dimana tempat connecting rod dipasangkan. Pada gambar 4.11 dibagi menjadi 3 daerah yakni awal retakan, penjalaran retak, dan retak akhir.

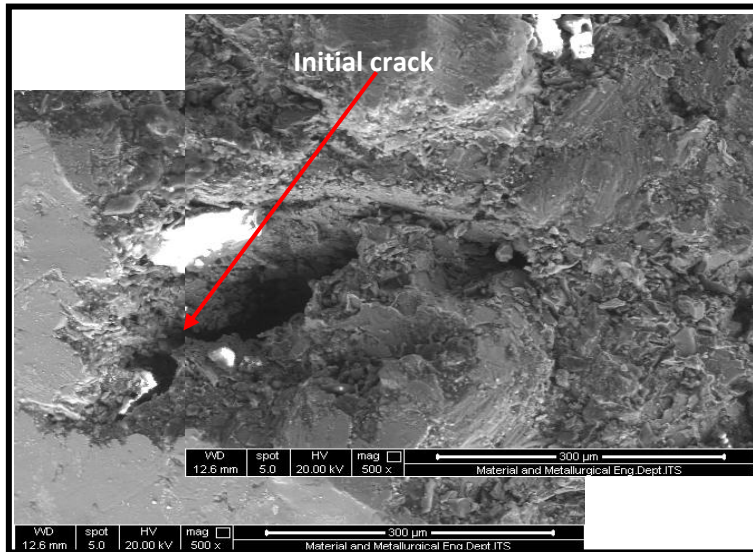
Pada gambar 4.12 daerah a diindikasikan sebagai daerah inisiasi crack. Daerah ini diambil tepat pada daerah pin piston tempat dimana connecting rod dipasangkan, yang mendapatkan pembebanan paling besar pada saat piston bekerja. Pada daerah awal retak ini tidak terdapat beachmark dan striasi yang terlihat menggunakan alat stereomikroskop dengan perbesaran 10x pada gambar 4.12 dan SEM pada gambar 4.13 yang berarti komponen ini menerima beban dinamis lebih sedikit dibandingkan beban statisnya. Hal ini sesuai dengan sifat material yang keras dan getas. Dari sini terlihat bahwa piston mengalami fatigue crack brittle dengan arah retakan yang tegak lurus dengan pembebanan. Pada gambar 4.14 memperlihatkan daerah initial crack pada piston dengan menggunakan SEM perbesaran 500x.



Gambar 4.12 Perbesaran pada daerah initial crack (a) diambil dengan mikroskop stereo perbesaran 10x

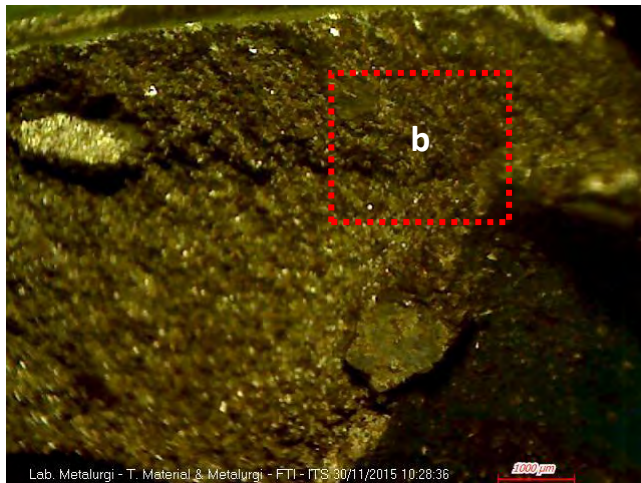


Gambar 4.13 Daerah initial crack perbesaran 50x dengan SEM

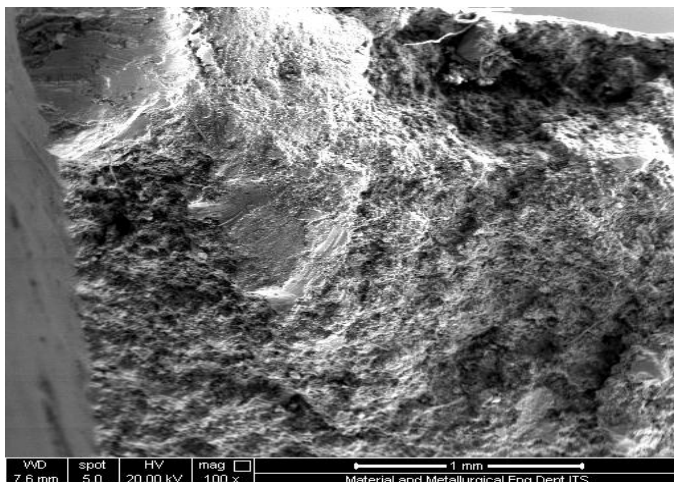


Gambar 4.14 Daerah initial crack dengan perbesaran 500x dengan SEM

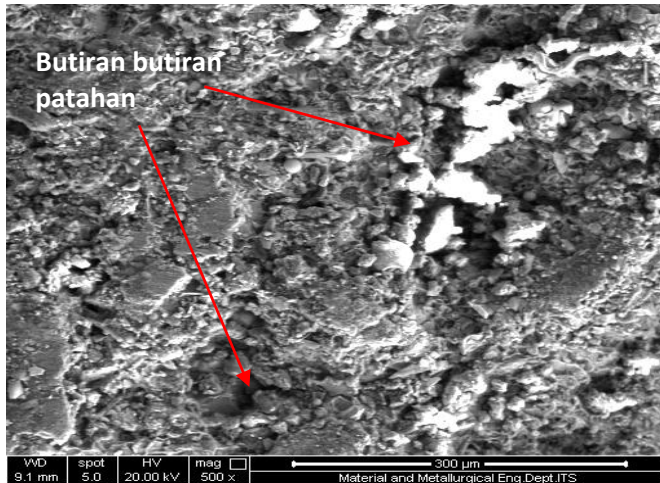
Pada gambar b adalah daerah perambatan retak pada piston yang mengalami kegagalan dimana terlihat adanya perbedaan ketinggian secara nyata serta warna yang lebih gelap dibandingkan daerah awal retak yang dapat dilihat pada gambar 4.15 dan dengan SEM pada perbesaran 50x pada gambar 4.16. Pada daerah ini terlihat adanya butiran butiran kasar yang merupakan ciri dari patah getas. Hal ini dibuktikan dengan pengujian SEM pada gambar 4.17 dimana pada gambar terlihat bahwa morfologi patahannya yaitu patah getas yang melintasi bitiran atau patah transgranular. Patah transgranular ini ditandai dengan adanya pola patahan yang membentuk butir butir yang tersebar secara acak.



Gambar 4.15 Perbesaran pada daerah crack propagation (b) diambil dengan mikroskop stereo perbesaran 10x.



Gambar 4.16 Daerah perambatan retak dengan perbesaran 100x dengan SEM, tampak perbedaan ketinggian yang nyata pada permukaan patahan.

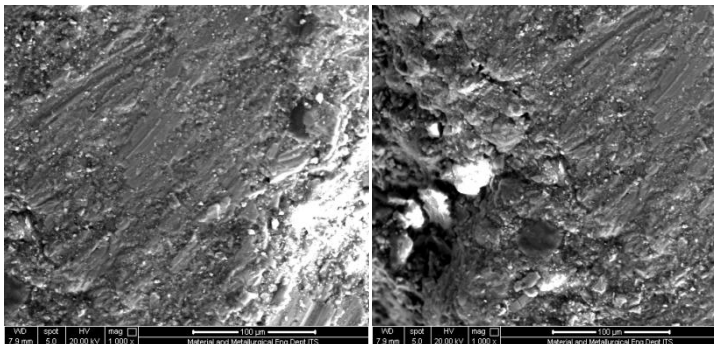


Gambar 4.17 Daerah perambatan retak perbesaran 500x dengan SEM. Terlihat butiran butiran yang menandai ciri ciri patah transgranular.

Pada gambar c adalah daerah patah akhir yang ditandai dengan adanya butir butir kasar dan tidak adanya beachmark yang terlihat secara makro, sehingga sudah sangat jelas bahwa bagian ini merupakan daerah patah akhir. Diperlihatkan pada gambar 4.18 diambil dengan mikroskop stereo perbesaran 10x. Selain itu, hasil dari SEM dengan perbesaran 1000x juga menunjukkan bahwa daerah c merupakan daerah patah akhir.



Gambar 4.18 Daerah patah akhir menggunakan stereo mikroskop perbesaran 10x



Gambar 4.19 Daerah patah akhir dengan SEM perbesaran 1000x

4.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan , pengujian komposisi kimia yang telah dilakukan menunjukkan



bahwa material piston mahle ini adalah paduan aluminium silikon hypoeutectic dengan kadar silikon kurang dari 12%. Hal ini diperkuat dengan pengujian metalografi dimana fasa yang terbentuk adalah fasa aluminium sebagai matriks serta fasa eutektik AlSi. Pada daerah yang dekat dengan patahan, fasa eutektik AlSi menyebar dengan merata sehingga kekerasan pada daerah ini menjadi lebih besar dibandingkan dengan daerah yang jauh dari patahan.

Dari hasil uji kekerasan menggunakan brinell menunjukkan adanya kenaikan kekerasan pada daerah yang dekat dengan patahan. Hal ini sesuai dengan pengujian komposisi dan metalografi yang telah dilaksanakan sebelumnya. Selain itu, kenaikan kekerasan pada bagian yang dekat dengan patahan 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 pembebanan yang diberikan oleh connecting rod kepada pin piston (daerah patahan), sehingga daerah ini mendapatkan tegangan berulang ulang secara langsung selama mesin bekerja.

Tegangan berulang ulang yang diberikan oleh connecting rod pada daerah pin piston yang merupakan daerah kritis (gambar 4.2) ini menyebabkan pin piston mengalami kelelahan sehingga dapat menimbulkan adanya daerah inisiasi crack. Menurut Zhang (2011), tegangan yang tinggi pada suatu material dapat menyebabkan material mengalami crack. Hal ini didukung dengan pengamatan secara visual maupun fraktografi, dimana pada patahan terdapat tiga daerah yaitu daerah inisiasi crack, daerah perambatan crack, dan daerah akhir crack.

Pada daerah inisial crack, merupakan retak awal yang ditandai dengan adanya permukaan yang lebih terang dan halus. Menurut Nishida Shin-ichi (1992). 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. Daerah perambatan retak merupakan daerah penjalaran retak dengan ciri ciri permukaan lebih gelap dibandingkan daerah inisial crack. Pada daerah ini, perbedaan ketinggian dapat terlihat secara makro. Pada hasil uji sem menunjukkan bahwa pola patahan yaitu patah getas transgranular atau melewati butir. Dan daerah terakhir merupakan daerah patah akhir dengan permukaan yang kasar dan datar.

Dari hasil penelitian diatas mengacu bahwa faktor penyebab kegagalan piston MAHLE ini adalah fatigue brittle. Hal ini ditandai dengan tidak terlihatnya beachmark dan striasi pada daerah inisial crack dimana berarti waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya patah dinamis lebih sedikit dibandingkan dengan waktu perambatan retak hingga patah akhir (patah statis). Patah fatigue brittle ini terjadi pada waktu yang cepat sehingga dapat dikatakan sebagai sudden failure dan terjadi pada material getas.

Diindikasi terjadinya kerusakan pada piston ini merupakan kesalahan pemasangan yaitu ketidak tepatan pemasangan connecting rod pada pin piston (kurang rapat). Kesalahan ini menyebabkan adanya penambahan tegangan yang terjadi pada daerah pin piston saat piston bekerja sehingga daerah ini sangat mudah sekali untuk mengalami crack.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Faktor yang menyebabkan kegagalan komponen piston MAHLE pada mesin MAN D 2866 LE Kapal Meratus Red Reliance PT. Meratus Line yaitu *fatigue Brittle failure* (kesalahan pemasangan).
2. Mekanisme kegagalan piston ini disebabkan karena kesalahan pemasangan pada saat penyambungan connecting rod sehingga material mengalami banyak retakan pada daerah pin piston yang memicu terjadinya patah pada piston.

5.2 Saran

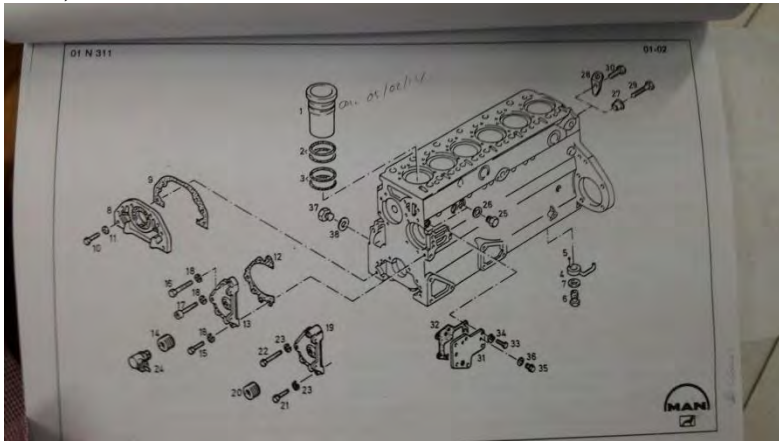
1. Berhati hati pada saat proses pemasangan dan pelepasan piston , serta pada saat memasang *connecting rod* untuk menghindari adanya daerah inisiasi retakan.
2. Melakukan monitoring secara langsung pada piston agar dapat memantau kinerja pada komponen ini, sehingga ketika mengalami penurunan kinerja dapat segera dilakukan *maintenance*.
3. Melakukan pemeriksaan berkala pada komponen ini agar dapat memastikan komponen tidak dalam keadaan cacat saat melakukan kerja.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

a) Data Mesin MAN D 2866 LE



| MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft | | D 2866 | | 50.99495-8112 | | | 01.88 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gruppe - Tafel / Group - Plate / Groupe - Planchette / Gruppo - Tavola / Grupo - Lámina | | LE | | | | | 01-02 |
| | Kurbelgehäuse | | | Crankcase | Bloc-cylindres | Basamento | Caja del cigüeñal |
| | Teile am Kurbelgehäuse | | | Parts for crankcase | Pièces sur le bloc-cylindres | Parti al basamento | Piezas en la caja cigüeñal |
| 1 | 51.01201-0309 | Zylinderlaufbuchse 145 mm Ø, außen (normal), Bundhöhe normal 10,07 mm | 6 | Cylinder liner 145 mm OD (standard), Depth of flange standard 10,07 mm | Chemise 145 mm Ø extérieur (normale), Hauteur de collerette normale 10,07 mm | Camicia cilindro 145 mm Ø esterno (normale), Altezza colliera normale 10,07 mm | Camisa 145 mm Ø exterior (normal), Altura del collar normal 10,07 mm |
| | oder | | | or | ou | ovvero | o |
| 1 | 51.01201-0324 | Zylinderlaufbuchse 145 mm Ø, außen (normal), Bundhöhe Übermaß 10,57 mm | 6 | Cylinder liner 145 mm OD (standard), Depth of flange oversize 10,57 mm | Chemise 145 mm Ø extérieur (normale), Hauteur de collerette surcote 10,57 mm | Camicia cilindro 145 mm Ø esterno (normale), Altezza colliera maggiore 10,57 mm | Camisa 145 mm Ø exterior (normal), Altura del collar sobremedida 10,57 mm |
| | oder | | | or | ou | ovvero | o |
| 1 | 51.01201-0326 | Zylinderlaufbuchse 145,5 mm Ø, außen (Reparatur-Stufe 1) | 6 | Cylinder liner 145,5 mm OD (repair stage 1) | Chemise 145,5 mm Ø extérieur (côte de réparation 1) | Camicia cilindro 145,5 mm Ø esterno (stadio riparazione 1) | Camisa 145,5 mm Ø exterior (tamaño de reparación 1) |
| | oder | | | or | ou | ovvero | o |

| MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft | | | | | | | 50.99495-8112 | 01-88 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------|----------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Gruppe - Tafel / Group - Plate / Groupe - Planché / Gruppo - Tavola / Grupo - Lámina | | | | | | | 01-02 | |
| | Kurbelgehäuse | D 2868 | LE | Crankcase | Bloc-cylindres | Basamento | Caja del cigüeñal | |
| | | | | | | | | |
| | Verschlußdeckel bei Motoren mit Rohwasserpumpe (Bild Nr. 13 - 18) | | | Cover for engines with raw water pump (fig. Nos. 13 - 18) | Couvercle d'alimentation pour moteurs avec pompe à eau brute (fig. No. 13 - 18) | Coperchio di chiusura ai motori con pompa acqua grezza (fig. no. 13 - 18) | Tapa de cierre en motores con bomba de agua natural (fig. Nos. 13 a 18) | |
| 13 | 51.01112-8017 | | 1 | Cover with part Fig. No. 14 | Couvercle avec la pièce fig. 14 | Coperchio di chiusura con parte fig. 14 | Tapa de cierre con la pieza de la fig. No. 14 | |
| 14 | 51.38131-0088 | | 1 | Connecting piece | Pièce raccord | Pezzo di attacco | Pieza de empalme | |
| | Kleber "Loctite 270 grün", (siehe 99 - 20) | | - | Adhesive "Loctite 270, green", (see 99 - 20) | Colle "Loctite 270, vert", (voir 99 - 20) | Adesivo "Loctite 270, verde", (vedi 99 - 20) | Reglamento "Loctite 270, verde", (véase 99 - 20) | |
| 15 | 5K.07283-7215 | Sechskantschraube | M10 x 25 | 1 | Hex. screw | Vite TH | Vite a testa esagonale | Tornillo hexagonal |
| 16 | 56.07283-7223 | Sechskantschraube | M10 x 60 | 1 | Hex. screw | Vite TH | Vite a testa esagonale | Tornillo hexagonal |
| 17 | 06.02109-0017 | Zylinderschraube | M10 x 25 | 4 | Socket-head screw | Vie à tête cylindrique | Vite cilindrica | Tornillo cónico |
| 18 | 06.18044-0211 | Federschabe | B10 | 6 | Spring washer | Rondelle élastique | Rondella elastica | Arandela elástica |

| MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft | | | | | | | 50.99495-8112 | 01-88 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Gruppe - Tafel / Group - Plate / Groupe - Planché / Gruppo - Tavola / Grupo - Lámina | | | | | | | 01-02 | |
| | Kurbelgehäuse | D 2868 | LE | Crankcase | Bloc-cylindres | Basamento | Caja del cigüeñal | |
| | | | | | | | | |
| 1 | 51.01201-0327 | Zylinderlaufbuchse 146 mm Ø, außen (Reparatur-Stufe 2) | 6 | Cylinder liner 146 mm OD (repair stage 2) | Chemise 146 mm Ø extérieur (côte de réparation 2) | Camicia cilindro 146 mm Ø esterno (stadio riparazione 2) | Camisá 146 mm Ø exterior (etapa de reparación 2) | |
| 2 | 51.98501-0417 | Runddichtung *) | 12 | O-seal *) | Joint torique *) | Anello a cordoncino di tenuta *) | Anillo de goma *) | |
| 3 | 51.98501-0412 | Runddichtung *) | 12 | O-seal *) | Joint torique *) | Anello a cordoncino di tenuta *) | Anillo de goma *) | |
| 4 | 51.01601-5066 | Öspritzdüse mit dem Teil Bild Nr. 5 | 8 | Oil sprayer nozzle with part Fig. No. 5 | Gicleur d'huile avec la pièce fig. 5 | Iniettore olio con parte fig. 5 | Tobera inyectora de aceite con la pieza de la fig. No. 5 | |
| 5 | 06.31633-0311 | Kugel | Ø 3 mm | 12 | Ball | Bille | Bola | |
| 6 | 51.06405-7017 | Östrückventil | | 6 | Oil pressure valve | Soupape de pression d'huile | Valvula pressione olio | Válvula de presión de aceite |
| 7 | 06.16044-0213 | Federschabe | B14 | 6 | Spring washer | Rondelle élastique | Rondella elastica | Arandela elástica |
| 8 | 51.01501-6011 | Deckel mit Wellendichtung und Spritzring | | 1 | Cover with shaft seal and thrower ring | Couvercle avec étoupeage et déflecteur | Coperchio con anello tenuta albero ed anello diffusor | Tapa con retén y anillo difusor |
| 9 | 51.01903-0162 | Dichtung *) | | 1 | Gasket *) | Joint *) | Guarnizione *) | Junta *) |
| 10 | 06.01283-7115 | Sechskantschraube | M8 x 25 | 8 | Hex. screw | Vite TH | Vite a testa esagonale | Tornillo hexagonal |
| 11 | 06.16044-0210 | Federschabe | B8 | 6 | Spring washer | Rondelle élastique | Rondella elastica | Arandela elástica |
| 12 | 51.01901-0178 | Dichtung *) | | 1 | Gasket *) | Joint *) | Guarnizione *) | Junta *) |

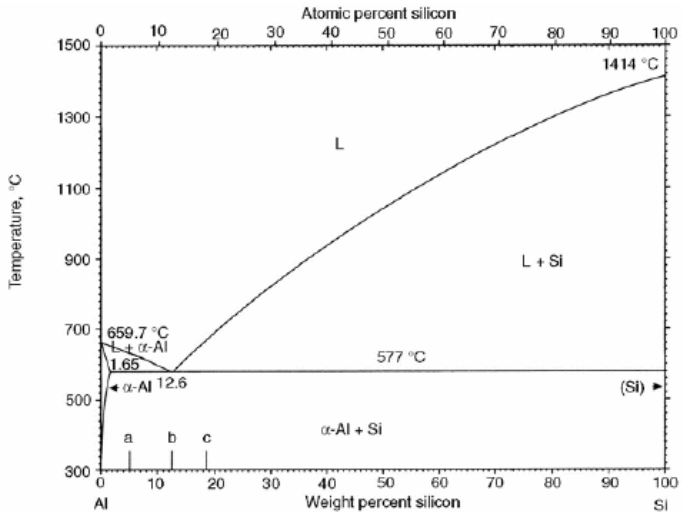
| MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft | | | | | | | 50.99495-6112 | 01.88 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------|
| Gruppe - Tafel / Group - Plate / Groupe - Planché / Gruppo - Tavola / Grupo - Lámina | | | | | | | 01-02 | |
| | Kurbelgehäuse | D 2866 | | Crankcase | Bloc-cylindres | Basamento | Caja del cigüeñal | |
| | | LE | | | | | | |
| | Verschlußdeckel bei Motoren ohne Rohwasserpumpe (Bild Nr. 19 - 23) | | | Cover for engines without raw water pump (fig. Nos. 19 - 23) | Couvercle d'obturation pour moteurs sans pompe à eau brute (fig. No. 19 - 23) | Coperchio di chiusura al motori senza pompa acqua greggia (fig. no. 19 - 23) | Tapa de cierre en motores sin bomba de agua natural (fig. Nos. 19 a 23) | |
| 19 | 51.01112-6017 | Verschlußdeckel mit dem Teil Bild Nr. 20 | 1 | Cover with part Fig. No. 20 | Couvercle avec la pièce fig. 20 | Coperchio di chiusura con parte fig. 20 | Tapa de cierre con la pieza de la fig. No. 20 | |
| 20 | 51.98131-0086 | Anschlußstück | 1 | Connecting piece | Pièce raccord | Pezzo di attacco | Pieza de empalme | |
| 21 | 06.01283-7215 | Sechskantschraube | M10x25 | 5 | Hex. screw | Via TH | Tornillo hexagonal | |
| | Kiebel "Loctite 270 grün", (siehe 99 - 20) | | | Adhesive "Loctite 270, green", (see 99 - 20) | Colle "Loctite 270, vert", (voir 99 - 20) | Adesivo "Loctite 270, verde", (vedi 99 - 20) | Pegamento "Loctite 270, verde", (véase 99 - 20) | |
| 22 | 06.01283-7220 | Sechskantschraube | M10x45 | 1 | Hex. screw | Via TH | Tornillo hexagonal | |
| | Kiebel "Loctite 270 grün", (siehe 99 - 20) | | | Adhesive "Loctite 270, green", (see 99 - 20) | Colle "Loctite 270, vert", (voir 99 - 20) | Adesivo "Loctite 270, verde", (vedi 99 - 20) | Pegamento "Loctite 270, verde", (véase 99 - 20) | |
| 23 | | anfällt | | | | supprimé | se suprime | |
| 24 | 51.27120-7013 | Winkeltrieb | 1 | Angle drive | Renvoi d'angle | Trasmissione ad angolo | Engranaje angular | |
| 25 | 06.08092-0144 | Verschlußschraube | M14x1,5 | 2 | Screw plug | Bouchon fileté | Tappo a vite | |
| 26 | 06.56180-0706 | Dichtung | A14x20 | 2 | Gasket | Annau-joint | Anillo ténica | |

| MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft | | | | | | | 50.99495-6112 | 01.88 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Gruppe - Tafel / Group - Plate / Groupe - Planché / Gruppo - Tavola / Grupo - Lámina | | | | | | | 01-02 | |
| | Kurbelgehäuse | D 2866 | | Crankcase | Bloc-cylindres | Basamento | Caja del cigüeñal | |
| | | LE | | | | | | |
| 27 | 01.81701-0088 | Abgasabflüsse (Auspuß wassergekühlt) | 1 | Exhaust bush (water cooled exhaust manifold) | Double d'écartement (bureau d'échappement refroidi par eau) | Boccola distanziana (scarico raffreddato ad acqua) | Cavallotto distanzador (escape refrigerado por agua) | |
| | oder | | | | or | ovvero | o | |
| 28 | 01.19202-0078 | Aufhängesäue (Auspuß ungekühlt) | 1 | Lifting eye (uncooled exhaust) | Oeillet de suspension (échappement non refroidi) | Occhioletto sospensione (scarico non raffreddato) | Caja de suspensión (escape no refrigerado) | |
| 29 | 06.01283-7620 | Sechskantschraube (Auspuß wassergekühlt) | M16x45 | 1 | Hex. screw (water cooled exhaust manifold) | Via TH (scarico raffreddato ad acqua) | Tornillo hexagonal (escape refrigerado por agua) | |
| | oder | | | | or | ovvero | o | |
| 30 | 06.01283-7618 | Sechskantschraube (Auspuß ungekühlt) | M16x35 | 1 | Hex. screw (uncooled exhaust) | Via TH (échappement non refroidi) | Tornillo hexagonal (escape no refrigerado) | |
| | Verschlußdeckel bei Motoren ohne Luftpresser bzw. Rohwasserpumpe (Bild Nr. 31 - 36) | | | Cover for engines without air compressor or raw water pump (fig. Nos. 31 - 36) | Bouchon fileté pour moteurs sans compresseur resp. pompe à eau brute (fig. No. 31 - 36) | Coperchio di chiusura al motori senza compressore aria, ovvero pompa acqua greggia (fig. no. 31-36) | Tapa de cierre en motores sin compresor de aire resp. bomba de agua natural (fig. Nos. 31 a 36) | |
| 31 | 51.54111-0006 | Verschlußdeckel | 1 | Cover | Couvercle | Coperchio di chiusura | Tapa de cierre | |
| | | | | | | Guarnizione | Junta | |

| MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft | | | | | | | 50.98495-8112 | 01.88 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------|---|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gruppe - Tafel / Group - Plate / Groupe - Plancha / Gruppo - Tavola / Grupo - Lámina | | | | | | | 01-02 | |
| | Kurbelgehäuse | | D 2866 | | Crankcase | Bloc-cylindres | Basamento | Caja del cigüeñal |
| | | | LE | | | | | |
| 27 | 51.91701-0088 Abstreifbüchse (Auspuff wassergekühlt) oder | | 1 | | Spacer bush (water-cooled exhaust manifold) ou | Double d'écrasement (broyeur d'échappement refroidi par eau) ou | Boccola distanzatrice (scarico raffreddato ad acqua) ovvero | Casquillo distanciador (escape refrigerado por agua) o |
| 28 | 51.18202-0078 Aufhängedose (Auspuff ungekühlt) | | 1 | 1 | Lifting eye (uncooled exhaust) | Oillet de suspension (échappement non refroidi) | Occhiale sospensione (scarico non raffreddato) | Cajete de suspensión (escape no refrigerado) |
| 29 | 06.01283-7520 Sechskantschraube (Auspuff wassergekühlt) oder | M16 x 45 | 1 | | Hex. screw (water-cooled exhaust manifold) or | Vis TH (broyeur d'échappement refroidi par eau) ou | Vis a testa esagonale (scarico raffreddato ad acqua) ovvero | Tornillo hexagonal (escape refrigerado por agua) o |
| 30 | 06.01283-7516 Sechskantschraube (Auspuff ungekühlt) | M16 x 35 | 1 | 1 | Hex. screw (uncooled exhaust) | Vis TH (échappement non refroidi) | Vis a testa esagonale (scarico non raffreddato) | Tornillo hexagonal (escape no refrigerado) |
| | Verschlußdeckel bei Motoren ohne Luftpressor bzw. Rohwasserpumpe (Bild Nr. 31 - 36) | | | | Cover for engines without air compressor or raw water pump (Fig. Nos. 31 - 36) | Bouchon fileté pour moteurs sans compresseur resp. pompe à eau brute (Fig. No. 31 - 36) | Coperchio di chiusura al motore senza compressore aria, ovvero pompa acqua grezza (fig. no. 31-36) | Tapa de cierre en motores sin compresor de aire resp. bomba de agua natural (Fig. Nos. 31 a 36) |
| 31 | 61.84111-0065 Verschlußdeckel | | 1 | | Cover | Couvercle | Coperchio di chiusura | Tapa de cierre |
| 32 | 51.84901-0068 Dichtung 7 | | 1 | | Gasket 7 | Joint 7 | Guarnizione 7 | Junta 7 |

| MAN Nutzfahrzeuge Aktiengesellschaft | | | | | | | 50.98495-8112 | 01.88 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gruppe - Tafel / Group - Plate / Groupe - Plancha / Gruppo - Tavola / Grupo - Lámina | | | | | | | 01-02 | |
| | Kurbelgehäuse | | D 2866 | | Crankcase | Bloc-cylindres | Basamento | Caja del cigüeñal |
| | | | LE | | | | | |
| 33 | 06.01283-7117 Sechskantschraube | M8 x 30 | 6 | | Hex. screw | Vis TH | Vis a testa esagonale | Tornillo hexagonal |
| 34 | 06.16731-2107 Federring | A8 | 6 | | Spring washer | Anneau-ressort | Anello elastico | Anillo elástico |
| 35 | 06.06092-2142 Verschlußschraube | M10 x 1 | 1 | | Screw plug | Bouchon fileté | Tappo a vite | Tornillo de cierre |
| 36 | 06.56180-0716 Dichtung | A10 x 16 | 1 | | Gasket | Anneau-joint | Anello tenuta | Junta anular |
| 37 | 06.06092-0206 Verschlußschraube | AM18 x 1,5 | 1 | | Screw plug | Bouchon fileté | Tappo a vite | Tornillo de cierre |
| 38 | 06.56180-0713 Dichtung | A18 x 24 | 1 | | Gasket | Anneau-joint | Anello tenuta | Junta anular |
| | 51.01222-0002 Unterriegel, zur Erhöhung des Zylinderlauchstücken- Überstandes (0,05 mm dick) (1 Satz = 6 Stück) | | 1 | | Backing ring, to increase the projection of the cylinder liner over the crankcase (0,05 mm thick) (1 set = 6 rings) | Anneau-support, pour l'augmentation du dépassement de la chemise (0,05 mm d'épaisseur) (1 jeu = 6 pièces) | Anello supporto, per aumentare la sporgenza della camicia (0,05 mm spessore) (1 serie = 6 pezzi) | Anillo soporte, para aumentar saliente de la camisa (0,05 mm de espesor) (1 juego = 6 unidades) |

c) Diagram FasaAl-Si



d) ASTM E140-02 (Standart Hardness Conversion For Metals)

TABLE 9 Approximate Hardness Conversion Numbers for Wrought Aluminum Products^{A, B, C}

| Brinell Hardness Number 500-kgf, (10-mm Ball) (HBS) | Vickers Hardness Number 15-kgf, (HV) | Rockwell Hardness Number | | | Rockwell Superficial Hardness Number | | |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| | | B Scale 100-kgf, ½-in. Ball (HRB) | E Scale 100-kgf, ½-in. Ball (HRE) | H Scale 60-kgf, ½-in. Ball (HRH) | 15-T Scale 15-kgf, ½-in. Ball (HR 15-T) | 30-T Scale 30-kgf, ½-in. Ball (HR 30-T) | 15-W Scale 15-kgf, ½-in. Ball (HR 15-W) |
| | | 160 | 189 | 91 | ... | ... | 89 |
| 155 | 183 | 90 | ... | ... | 89 | 76 | 95 |
| 150 | 177 | 89 | ... | ... | 89 | 75 | 94 |
| 145 | 171 | 87 | ... | ... | 88 | 74 | 94 |
| 140 | 165 | 86 | ... | ... | 88 | 73 | 94 |
| 135 | 159 | 84 | ... | ... | 87 | 71 | 93 |
| 130 | 153 | 81 | ... | ... | 87 | 70 | 93 |
| 125 | 147 | 79 | ... | ... | 86 | 68 | 92 |
| 120 | 141 | 76 | ... | ... | 86 | 67 | 92 |
| 115 | 135 | 72 | 101 | ... | 86 | 65 | 91 |
| 110 | 129 | 69 | 100 | ... | 85 | 63 | 91 |
| 105 | 123 | 65 | 99 | ... | 84 | 61 | 91 |
| 100 | 117 | 60 | 98 | ... | 83 | 59 | 90 |
| 95 | 111 | 56 | 96 | ... | 82 | 57 | 90 |
| 90 | 105 | 51 | 94 | 108 | 81 | 54 | 89 |
| 85 | 98 | 46 | 91 | 107 | 80 | 52 | 89 |
| 80 | 92 | 40 | 88 | 106 | 78 | 50 | 88 |
| 75 | 86 | 34 | 84 | 104 | 76 | 47 | 87 |
| 70 | 80 | 28 | 80 | 102 | 74 | 44 | 86 |
| 65 | 74 | ... | 75 | 100 | 72 | ... | 85 |
| 60 | 68 | ... | 70 | 97 | 70 | ... | 83 |
| 55 | 62 | ... | 65 | 94 | 67 | ... | 82 |
| 50 | 56 | ... | 59 | 91 | 64 | ... | 80 |
| 45 | 50 | ... | 53 | 87 | 62 | ... | 79 |
| 40 | 44 | ... | 46 | 83 | 59 | ... | 77 |

^A Data were generated in an interlaboratory test program conducted by ASTM Subcommittee E28.06. Supporting data available from ASTM Headquarters. Request RR: E28-1005.

^B In table headings, kgf or gf refers to total test force.

^C Appendix X9 contains equations converting determined hardness scale numbers to Brinell numbers for wrought aluminum products. Refer to 1.11 before using conversion equations.



DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1990. *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International Handbook Committee.
- _____. 1990. *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagram*. ASM International Handbook Committee.
- _____. 2002. *ASM Handbook Vol.9 Metallographic and Microstructure*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. *ASM Handbook Vol.12 Fractography*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. *ASM Handbook Vol.19 Fatigue and Fracture*. Material Park. Ohio. USA. ASM International.
- _____. 2002. *ASTM E10-10 Standard Test Method For Brinell Hardness Of Metallic Materials*. USA. ASTM International.
- Brook, C. R.& Choudury, A. 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York : McGraw Hills.
- 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.



- Courtney, Thomas H. 1990. *Mechanical Behavior Of Materials*. Singapore : McGraw-Hill Book Co.
- Dieter, George E. 1987. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta :Erlangga.
- Harun, Mohd., Talib, I. A., Daud, A, R.. 1994. *Effect of Element Addition On Wear Property of Eutectic Aluminium-Silicon Alloys*. Elsevier Science. Wear 194: 54-59.
- Junker H, Issler W. *Pistons for high loaded direct injection diesel engines*. MAHLE Technical Information.
- MAHLE, *Kolben fur Verbrennungsmotoren Die Bibliothek der Technik*; 1998. p. 39.
- MAHLE, *Pistons for high loaded direct injection diesel engines*. Technical Information. p. 12.
- Nishida, Shin-ichi.1992.*Failure Analysis in Engineering Application*.Jordan Hill. Oxford. Butterworth-Heinemann Ltd.
- R. Brooks, Charlie and Choudhury, Ashok. 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York : McGraw-Hill.
- Surdia Tata & Saito Shinroku. 1975. *Pengetahuan Bahan Teknik*. Jakarta.: Pradnya Paramita.

BIODATA PENULIS



Penulis yang bernama lengkap Nico Bagus Putranto dilahirkan di Kediri pada tanggal 14 Juni 1993. Penulis merupakan anak kedua dari 3 bersaudara, dan telah menempuh pendidikan formal yaitu SDN Lirboyo IV Kediri, SMP Negeri 4 Kediri dan SMA Negeri 2 Kediri. Setelah lulus dari SMA, penulis mengikuti tes dan diterima sebagai calon Mahasiswa Baru Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2012. Penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI ITS dengan nomor registrasi

pokok 2712 100 100.

Semasa kuliah, penulis terdaftar aktif sebagai staff Hubungan Luar Himpunan Mahasiswa Teknik Material (HMMT) periode 2013-2014 dan sebagai Ketua Departemen Hubungan Luar HMMT periode 2014-2015. Dalam bidang ilmiah penulis cukup aktif dalam pembuatan Program Kreatifitas Mahasiswa, lolos dalam Program Kreativitas Mahasiswa dalam bidang Kewirausahaan (PKM-K) yang didanai oleh Dikti pada tahun 2015 dengan judul PKM-K "DOKADO (delivery order kado) penyedia kado unik dan kreatif dengan konsep creative gift dan experience gift yang bekerjasama dengan online shop dan komunitas di Surabaya".

Selesai tugas akhir ini mengantarkan penulis memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) pada Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya.

Email : nicobagusputranto100@gmail.com