

ANALISIS KEGAGALAN MATERIAL

Dr.Ir. Hendri Chandra, M.T.

Dosen tetap pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas
Sriwijaya.

Edisi Oktober, 2020

DAFTAR ISI

Daftar Isi	2
Kata Pengantar	3
Nomenklatur	4
Bab I. Pendahuluan	5
Bab II. Kriteria Kegagalan	9
Bab III. Modus Kegagalan	15
Bab IV. Penyebab kegagalan	40
Bab V. Metode Analisis	47
Bab VI. Pengujian dan Pemeriksaan	62
Daftar pustaka	75
Indeks	80
Glosarium	83

KATA PENGANTAR

Kompetensi dari modul ajar Analisa Kegagalan ini merupakan rangkuman dari hasil penelitian selama kurang lebih 10 tahun terakhir, Tujuannya adalah untuk meningkatkan kualitas proses pembelajaran dalam mata kuliah Analisa kegagalan di Universitas Sriwijaya, pada Fakultas Teknik Jurusan mesin di Indonesia. Analisa Kegagalan merupakan mata kuliah keahlian dan sebagai mata kuliah pilihan di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya Palembang.

Namun demikian tidak menutup kesempatan kepada disiplin ilmu lain seperti Teknik Sipil, Teknik Metalurgi, Teknologi pertanian di dalam rancang bangun konstruksi, komponen mesin, dan alat-alat mesin pertanian.

Buku teks maupun buku ajar dibidang analisa kegagalan yang dalam bahasa Indonesia masih dirasakan sangat kurang dalam membantu mahasiswa dalam memahami ilmu analisa kegagalan.

Semoga buku ajar ini akan bermanfaat dalam proses pembelajaran pada mata kuliah analisa kegagalan.

Palembang, 4 Oktober, 2020

Hendri Chandra

NOMENKLATUR

σ_y	Tegangan luluh (MPa)
σ_u	Tegangan maksimum (MPa)
σ_f	Tegangan patah (MPa)
e	Regangan (%)
S	Stress
N	siklus
α	Ferite
P	Perlit
Fe ₃ C	Simentit
HAZ	Heat affected zone
GTAW	Gas Tungsten Inert Welding
BHN	Brinnel Hardness number
Ra,b,c	Rockwel a,b,c
VHN	Vickers Hardness number
NDT	Non destructive test
SOP	Standard Operation Procedure

BAB I PENDAHULUAN

Kerusakan atau sering disebut juga kegagalan dalam material komponen mesin. Konstruksi umum, Industri, struktur transportasi, baik struktur transportasi darat, laut dan transportasi udara/pesawat terbang sering kali terjadi. Kegagalan biasanya tidak mudah untuk diprediksi secara dini. Hal ini dikarenakan banyaknya variabel yang mempengaruhi umur alat atau sering disebut dengan istilah *life time*.

Kegagalan material tidak bisa dihindari karena tidak ada yang abadi di muka bumi ini, namun hanya dapat dikendalikan atau dikontrol agar supaya mendapatkan umur pakai atau disebut *life service* yang baik sehingga dapat mendekati umur alat yang diharapkan pada waktu desain atau perancangan alat tersebut.

Kerusakan suatu komponen mesin, konstruksi, atau komponen pada suatu industri dan lain-lain akan mengganggu kelancaran operasi dan bahkan menyebabkan kerugian yang besar. Tidak jarang kerusakan berdampak kepada lingkungan

dan bahkan korban jiwa. Kerusakan komponen vital pada suatu pabrik atau industri sering mengalami kerugian yang besar hanya dalam hitungan hari. Ketika suatu industri berhenti operasi dikarenakan kerusakan, apakah berupa kebocoran, retak, patah dan-lain-lain sampai mengalami kerugian milyaran rupiah dan ada yang mengalami kerugian Triliun rupiah. Tentu hal ini merupakan mengalami kerugian yang besar.

Oleh karena itu kegagalan yang sifatnya insidental dan prematur sebaiknya dilakukan analisis agar ditemukanodus dan penyebab kegagalan agar supaya kegagalan dengan modus dan penyebab yang sama tidak terulang kembali disebabkan oleh kesalahan-kesalahan atau error. Tindakan-tindakan preventif berupa perawatan yang terjadwal serta pemeriksaan secara berkala perlu dilakukan agar supaya memperkecil peluang kejadian-kejadian yang tidak diinginkan.

Sebagai seorang analist atau seorang Engineer, maka harus mampu membuktikan dan mengungkap modus kegagalan serta menemukan penyebab kegagalan. Untuk dapat melaksanakan hal ini maka perlu dibekali oleh dasar-dasar ilmu teknik mesin, serta dibekali oleh wawasan dibidang metallurgi, konstruksi, termasuk kemampuan menggunakan alat-alat

pengujian dan pemeriksaan baik destruktif maupun non destruktif. Disamping itu kemampuan didalam fotografi juga akan menambah nilai tambah didalam pemeriksaan visual. Namun kemampuan seorang fotografi seorang engineer analisis kegagalan berbeda dengan seorang fotografi yang profesinya komersil. Seorang fotografer yang komersil selalu akan berusaha menampilkan dan menghindari bagian yang cacat, sedangkan seorang analist kegagalan selalu berusaha menampilkan dan memfokuskan bagian-bagain yang cacat untuk sebagai bahan analisis didalam kegagalan material.

Soal Latihan :

1. Jelaskan definisi kegagalan atau kerusakan dalam material teknik?
2. Bilamana komponen mesin atau konstruksi dikatakan gagal atau rusak?
3. Bilamana kerusakan atau kegagalan selayaknya untuk di analisis?

Umpan Balik dan Tindak Lanjut : Mahasiswa lebih peka memaknai tentang kerusakan material, sehingga mampu

memilih dan memilah kerusakan atau kegagalan yang layak untuk dianalisis

Daftar Pustaka :

ASM Handbook,2002, Failure analysis and prevention, vol X1, Amazon, NewYork.

C.Brooks, A.Choudhury, C.R.Brooks,2001, Failure analysis of engineering material,1st edition, McGraw-Hill Book company, New York.

Daftar Kata Penting :

Failure : Kegagalan

Life time : Umur pakai

Pemateur : Lebih awal

BAB II. Kreteria Kegagalan

Kegagalan atau kerusakan suatu material tidak bisa dihindari selagi komponen terus beroperasi. Suatu komponen dikatakan gagal atau rusak bilamana komponen tersebut mengalami penurunan unjuk kerja. Sebagai contoh penurunan efisiensi pompa, dimana debitnya menurun meskipun pompa tersebut masih bisa beroperasi. Suatu komponen tidak bisa beroperasi lagi dikarenakan ada bagian yang mengalami kerusakan berupa retak, patah, bocor dan lain-lain sehingga stop beroperasi. Sebagai contoh suatu kilang mengalami kebocoran dan terbakar. Atau suatu poros penggerak mengalami patah sehingga tidak bisa lagi meneruskan daya dan putaran. Komponen atau konstruksi yang beroperasi namun keadaannya membahayakan lingkungan dan orang yang ada disekitarnya juga bisa dikategorikan telah mengalami kerusakan atau kegagalan.

Didalam operasinya komponen mesin yang didesain sebelumnya untuk dapat dioperasikan hingga umur desain yang disebut life time. Dalam kondisi ini diharapkan komponen akan mengalami kegagalan ketika mencapai umur desain. Namun pada kenyataannya komponen mesin sering mengalami kegagalan jauh dari umur desain atau disebut kondisi “Premature”. Kerusakan komponen mesin pada kondisi premature ini perlu dilakukan kajian dan analisis untuk mendapatkan modus kegagalan dan penyebab kegagalan. Kajian atau analisis pada suatu kegagalan atau kerusakan akan lebih menarik jika kegagalan yang terjadi tergolong pada kondisi yang prematur. Hal ini dikarenakan pada kondisi ini dapat di hipotesis adanya kesalahan yang perlu diungkap, dikarenakan umur pakai alat masih jauh dari yang diharapkan ketika pada waktu desain dan pembuatan alat atau komponen.

Kegagalan dalam bentuk apapun juga dimulai adanya beban, tanpa beban kecil kemungkinan konstruksi atau kompoen mesin akan mengalami kegagalan. Beban dapat berupa gaya, termal, tekanan, momen dain-lain yang dapat menyebabkan konstruksi mengalai deformasi atau perubahan bentuk.

Berdasarkan definisi deformasi bahwa suatu material dapat mengalami deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis adalah perubahan bentuk yang tidak permanen atau sementara. Kondisi ini tidak begitu membahayakan dikarenakan masih dalam kondisi aman. Namun kondisi elastis akan lebih berbahaya bila mana suatu konstruksi mengalami pembebanan yang bolak balik atau fluktuatif meskipun beban yang dialami masih dalam kondisi elastis. Hal ini dikarenakan beban bolak balik apakah beban tarik-tekan, puntir yang bolak balik dan lain-lain akan menyebabkan material mengalami lelah atau fatigue. Kegagalan jenis ini banyak sekali terjadi di dunia teknik mesin, bahkan kegagalan jenis ini justru yang paling banyak terjadi dari semua jenis kegagalan atau kerusakan.

Deformasi plastis merupakan kondisi yang membahayakan karena dapat merubah bentuk material secara tetap. Jadi sangat dihindari suatu konstruksi umum atau elemen mesin yang mengalami deformasi plastis. Contoh defleksi jembatan yang melebihi batas ambang akibat overload. Pegas daun kendaraan yang menderita akibat terlalu beratnya suatu kendaraan truk, pipa yang mengalami pembengkakan akibat

tekanan gas dan sebagainya, yang kesemuanya itu dampak dari deformasi plastis yang terjadi.

Dalam perancangan suatu konstruksi atau elemen mesin agar tidak terjadi kegagalan dini, harus dilihat dahulu jenis pembebanan. Untuk Pembebanan statis tegangan luluh bahan atau tegangan maksimum menjadi acuan dalam desain. Sedangkan untuk beban dinamis seperti beban bolak balik, getaran, ketahanan fatigue atau endurance limit menjadi rujukan. Tegangan yang bekerja seringkali kompleks, seperti tegangan pipa gas yang berada di bawah tanah. Bentuk tegangan ini disebut tegangan gabungan, dimana tekanan dan temperatur gas memberikan tegangan dalam pipa sedangkan berat tanah berasal dari beban luar. Untuk itulah dalam perancangan perlu diperhatikan jenis material yang tepat, dimensi, manufaktur, jenis beban dan faktor keamanan.

Kriteria Luluh Mterial

Kriteria kegagalan atau kriteria luluh adalah kriteria dalam perancangan material mesin terutama yang mengalami beban statis yang digunakan agar supaya tidak mengalami deformasi plastis. Kriteria lain yang mengacu kepada

kelelahan, akibat getaran dan keausan. Ada banyak kriteria, diantaranya adalah kriteria luluh Tresca dan Von Mises yang sama sama membuktikan kapan material akan mengalami deformasi plastis sebagai awal dari kerusakan.

Soal Latihan :

1. Jelaskan kriteria luluh kegagalan atau kerusakan yang anda ketahui?
2. Apa perbedaan kriteria luluh Tresca dan Von Mises, jelaskan dengan rumus ?
3. Bilamana dikatakan bahwa material mengalami kegagalan menurut Von Mises?
4. Apa perbedaan deformasi plastis dan elastic?

Umpan Balik dan Tindak Lanjut : Dengan memahami kriteria luluh kegagalan mahasiswa mampu membuktikan apakah pembebanan suatu komponen atau konstruksi akan membahayakan akibat beban lebih.

Daftar Pustaka :

ASM Handbook,2002, Failure analysis and prevention, vol X1, Amazon, NewYork.

C.Brooks, A.Choudhury, C.R.Brooks,2001, Failure analysis of engineering material,1st edition, McGraw-Hill Book company, New York.

Daftar Kata Penting :

Overload	: Beban lebih
Von Mises	: Kreteria luluh bahan
Tresca	: Keteria luluh bahan
Platisitas	: Kondisi plastis
Elastisitas	: Kondisi elastic
Safety factor	: Faktor keamanan
Yield strength	: Kekuatan luluh bahan

BAB III. MODUS KEGAGALAN

Didalam menganalisis kegagalan, seorang analist berusaha menemukan dan membuktikan dengan suatu metode yang terukur modus kegagalan serta penyebab kegagalan dari suatu kasus kerusakan material. Setelah diperoleh modus dan penyebab kegagalan, seorang peneliti harus mampu memberikan sumbang saran atau rekomendasi agar supaya kegagalan tidak terulang kembali dengan modus dan penyebab yang sama. Tidak semua orang dapat menganalisis suatu kerusakan bilamana tidak memiliki dasar ilmu dibidang analisis kegagalan. Seorang analist atau peneliti harus dibekali dengan pengetahuan-pengetahuan yang terkait, seperti ilmu metalurgi yang baik, mekanika retak serta didukung oleh ilmu dasar teknik mesin yang baik pula.

Modus kegagalan dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

1. Kegagalan diakibatkan deformasi plastis
2. Kegagalan akibat fatigue atau kelelahan
3. Kegagalan akibat gesekan dan abrasi

4. Kegagalan akibat korosi dan hidrogen embrittlement
5. Kegagalan akibat vibrasi dan fretting
6. Kegagalan akibat cacat las
7. Kegagalan akibat cacat cor
8. Kegagalan akibat perlakuan panas dan permukaan
9. Kegagalan akibat proses pembentukan
10. Kegagalan akibat dari assembly atau perakitan

III.1. Kegagalan akibat deformasi plastis

Kegagalan akibat deformasi plastis diartikan bila beban yang terjadi pada material komponen mesin, konstruksi sudah menyamai dan bahkan melampaui beban luluh material tersebut. Akibat atau dampak dari beban lebih ini menyebabkan terjadinya perubahan bentuk atau deformasi plastis atau permanen. Kondisi ini sangat membahayakan konstruksi mesin tersebut dan dapat menyebabkan konstruksi tersebut roboh, bocor, pecah, bengkok terjadi benjolan, retak dan lain-lain.

Deformasi plastis secara makro dikatakan sebagai terjadinya perubahan bentuk yang tidak sama dengan bentuk awal atau aslinya. Sedangkan secara mikro deformasi plastis

terjadi dikarenakan terjadinya pemutusan rantai atom pada sistem kristal.

Deformasi plastis atau permanen disebabkan oleh beban yang bekerja sudah melampau beban luluh bahan atau tegangan yang bekerja sudah melampau tegangan luluh material atau dikatakan bahwa σ_w lebih besar dari σ_y . Kegagalan akibat beban lebih banyak sekali terjadi di dunia teknik mesin, sebagai contoh katub bengkok, chasis berubah bentuk, pelat bodi kendaraan yang penyok dan lain-lain.

Deformasi plastis tidak selamanya merugikan, namun ada deformasi plastis yang sengaja diperlakukan pada suatu material untuk memperoleh bentuk yang diinginkan. Kondisi ini dapat kita temui pada proses manufaktur pada proses pembentukan material seperti proses pembentukan pelat tipis untuk bodi kendaraan bermotor, pembentukan material logam dengan bahan baku bilet, bloom dan slab menjadi bentuk profil, batang-batang, pelat, kawat dan lain-lain. Untuk proses ini deformasi plastis diperlukan dan dibuat dengan sengaja dan tidak bisa dikategorikan sebagai kegagalan atau kerusakan. Beberapa proses pembentukan logam pada proses manufaktur seperti : proses forging, proses rolling, proses wire drawing,

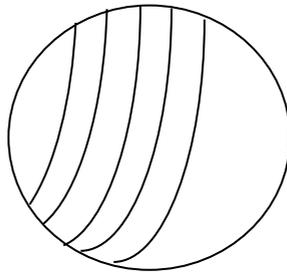
proses deep drawing dan lain-lain yang bekerja pada kondisi plastis.

III.2. Kegagalan Akibat fatigue

Kegagalan akibat lelah atau fatigue adalah salah satu jenis modus kegagalan yang paling sering terjadi di dunia Teknik Mesin. Menurut literatur lebih dari 70 persen kegagalan pada aplikasi Teknik Mesin disebabkan oleh fatigue. Fatigue dicirikan dengan beban yang berulang atau beban bolak balik. Seperti beban tarik-tekan, lentur bolak balik, torsi bolak balik dan lain-lain.

Kegagalan akibat fatigue jika mengalami patah atau retak dicirikan dengan adanya tiga tahap yaitu adanya awal retak, perambatan retak serta patah akhir. Awal retak berawal dari cacat logam atau diskontinuitas material sehingga menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan. Diskontinuitas material tersebut dapat berupa lubang, pori, undercut, blowholes, dan lain-lain. Pada daerah sekitar cacat tersebut terjadi tegangan yang tinggi, sehingga memicu munculnya awal retak. Kemudian retak merambat yang dicirikan dengan adanya “beachmark” atau “garis pantai” dan striasi sebagai ciri

dari patah leleh. Namun bedanya beachmark adakalanya bisa dilihat dengan kasat mata, sedangkan striasi hanya bisa dilihat dengan scanning electron microscope (SEM). Gambaran beachmark dan striasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Beach mark dan striasi

Formasi dari beachmark atau striasi sangat dipengaruhi oleh tegangan nominal yang terjadi tipe pembebanan serta ratio tegangan (R). Beachmark akan tampak lebih teratur dan bisa dilihat dengan mata jika ratio tegangan dimana tegangan maksimum sama besar dengan tegangan minimum, atau dikatakan pada ratio tegangan $R = -1$. Tegangan nominal yang relatif kecil akan menampakkan luasan beachmark yang lebih

luas sedangkan sebaliknya tegangan nominal yang besar akan menampakan rambatan beachmark yang sempit.

Berbeda dengan kegagalan akibat beban lebih, kegagalan akibat lelah atau fatigue terjadi pada kondisi elastis. Namun beban yang relatif kecil tersebut diiringi dengan siklus beban yang bolak balik, sehingga kondisi ini sangat membahayakan. Kegagalan akibat lelah ini tidak menunjukkan indikasi awal seperti beban lebih, dimulai dengan adanya pengecilan penampang atau necking. Sehingga tanpa diketahui sudah mengalami patah. Sebagai contoh patahnya pegas spiral pada pengatur katub ruang bakar, poros roda patah dan lain-lain.

Patah akibat fatigue yang disebabkan beban elatis tidak menunjukkan indikasi perubahan bentuk yang nyata yang dapat dilihat dengan mata, hal ini dikarenakan kegagalan akibat fatigue hampir tidak menampakan perubahan regangan seperti perubahan panjang dan sebagainya. Oleh karena itu kegagalan ini tidak menunjukkan indikasi sebagai peringatan seperti adanya perubahan bentuk, adanya necking dan sebagainya, sehingga hal ini sangat membahayakan sekali.

Permukaan patah pada kegagalan fatigue dibagi menjadi dua zone yaitu zone pertama permukaan patahnya rata mirip seperti patah getas namun lebihnya mengkilap, diikuti dengan zone kedua permukaan patah statik dengan adanya deformasi plastis atau permukaan yang tidak rata.

Oleh karena itu ketahanan lelah atau fatigue perlu ditingkatkan seperti pada poros, roda gigi, pegas dan lain dengan dengan cara diperlakukan permukaan. Perlakuan ini akan dibahas lebih jauh pada modus kegagalan akibat perlakuan panas dan permukaan.

III.3. Kegagalan Akibat Gesekan dan Abrasi

Gesekan dalam aplikasi teknik, khususnya Teknik Mesin banyak sekali terjadi, karena mesin pada dasarnya bergerak satu sama lain. Seperti poros dan roda gigi. Gesekan ditimbulkan oleh gerak relatif dari kedua komponen sehingga menimbulkan gesekan. Gesekan banyak ditemui di dunia teknik mesin seperti pada bantalan, roda gigi, piston dan lain-lain yang tidak bisa dihindari. Sedangkan abrasi disebabkan oleh partikel keras yang menerpa komponen lain dengan adanya

kecepatan. sehingga menimbulkan goresan. Hal ini juga dapat menurunkan unjuk kerja komponen.

Namun disamping kerugian adanya gesekan, di sisi lain gesekan bermanfaat bagi kehidupan manusia, sebagai contoh tanpa adanya gesekan antara roda dan jalan, maka kendaraan tidak dapat bergerak maju. Seorang penerjun payung membutuhkan gesekan antara tubuhnya dan udara untuk mengatur kecepatan.

Dampak gesekan tentu bisa mengurangi dimensi dan dapat dikurangi dengan mengurangi kontak penuh kedua material dengan cara memberikan pelumas atau gemuk diantara kedua komponen tersebut. Namun gesekan tidak bisa dihindari secara total. Dimensi yang berkurang akibat aus akan menurunkan kekuatan bahan, sehingga memperbesar tegangan yang terjadi, akibatnya komponen menjadi lebih tidak aman dibandingkan dengan sebelum mengalami keausan.

Secara umum bahwa gaya gesek statis adalah perkalian dari koefisien gesek terhadap gaya normal.

$$F_g = \mu \times F_n$$

Semakin besar gesekan, maka semakin besar nilai koefisien gesekan, sebaliknya semakin kecil gesekan maka semakin kecil gesekan. Nilai koefisien gesek berkisar antara nol dan satu.

III.4. Kegagalan Akibat Korosi dan Pengetasan Hidrogen

Komponen mesin atau konstruksi yang beroperasi di lingkungan yang korosif atau mengalirkan zat yang korosif atau beroperasi di daerah pantai, maka serangan korosinya akan tinggi. Korosi adalah peristiwa alam atau elektro kimiawi yang tidak bisa dihindari, namun hanya bisa dikendalikan.

Logam yang terekspos korosi akan mengalami penurunan kekuatan dan unjuk rupa, sehingga sangat berbahaya sekali dalam operasinya. Produk korosi berupa karat yang berwarna kecoklatan. Komponen yang terekspos korosi akan mengalami penurunan kekuatan dan dapat membahayakan konstruksi atau komponen mesin itu sendiri.

Jenis-jenis korosi pada logam dapat diklasifikasikan sebagai berikut

- a. Korosi merata
- b. Korosi selektif
- c. Korosi galvanik

- d. Korosi batas butir
- e. Korosi retak tegang
- f. Korosi sumur
- g. Korosi celah
- h. Korosi erosi
- i. Korosi lelah

Kesemua jenis korosi di atas memiliki ciri dan mekanisme yang berbeda dalam terbentuknya. Unsur hidrogen yang terjebak dalam baja dalam suhu yang tinggi dapat menyebabkan pembengkakan pada baja berupa blister. Baja yang sebelumnya ulet bila terpenetrasi hidrogen dalam suhu tinggi, maka dapat berubah menjadi getas. Fenomena ini disebut dengan Hidrogen embrittlement atau penggetasan akibat hidrogen yang sangat membahayakan konstruksi. Atom hidrogen yang terkumpul pada suatu tempat di dalam logam menjadi molekul hidrogen, seperti pada kasus pengelasan. molekul hidrogen yang terjebak terpengaruh panas maka akan menimbulkan tekanan didalam logam. Akibatnya terjadi pembekakan yang merapuhkan logam, dan bila terkenan gaya maka akan mudah patah.

III.5. Kegagalan Akibat Vibrasi dan Fretting

Getaran mekanik atau vibrasi yang melebihi batas ambang yang terjadi pada suatu komponen merupakan indikasi bahwa komponen-komponen mesin yang berputar yang mengalami gaya sentrifugal. Sebagai contoh pompa sentrifugal, poros turbin dan lain-lain dapat menimbulkan getaran yang tinggi. Getaran di karakterisasi antara amplitudo dan siklus, semakin besar amplitudo maka semakin besar getaran yang ditimbulkan. Getaran yang berlebihan dapat menimbulkan kebisingan atau noise. Noise yang angka desibelnya melampaui batas ambang berdampak pada kesehatan pendengaran orang disekitarnya.

Salah satu indikator yang dapat diukur dari getaran adalah frekuensi (Hertz). Jika frekuensi yang terjadi atau tereksitasi melampaui frekuensi pribadi komponen, maka komponen mesin tersebut sudah dapat dikatakan mengalami kegagalan atau kerusakan. Frekuensi dapat diukur atau dihitung baik secara analitis maupun dengan eksperimen.

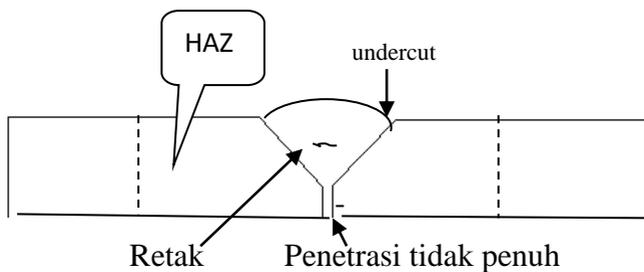
Kegagalan akibat Fretting adalah kerusakan diakibatkan terkikisnya permukaan dari benda kontak dua benda yang bergetar

III.6. Kegagalan Akibat Cacat Las

Kegagalan atau kerusakan suatu komponen tidak jarang dikarenakan modus pengelasan. Pengelasan yang tidak sesuai dengan standar las yang tepat serta dilakukan oleh tukang las tidak profesional yang tidak memiliki sertifikasi las, maka akan menimbulkan masalah pada komponen yang dilas.

Pemilihan jenis mesin las harus sesuai dengan material yang dilas. Artinya seseorang tukang las atau welder harus memiliki wawasan ilmu metallurgi yang memadai, jika tidak hasil pengelasannya tidak akan sempurna. Sebagai contoh Baja karbon rendah memiliki sifat mapu las (weldability) yang baik dibandingkan baja karbon medium atau tinggi. Sebaliknya baja karbon tinggi dan medium memiliki sifat mampu keras (Hardenability) yang baik dibandingkan baja karbon rendah. Namun sifat mampu lasnya rendah dikarenakan dapat terbentuk fasa rapuh seperti fasa martensit pada daerah sekitar las. Contoh lain Baja tahan karat (stainless steel) dan aluminium paduan tidak cocok bila dilas dengan mesin las gas atau busur listrik yang biasa digunakan dipasaran, melainkan direkomendasikan bila perlu disambung dengan mesin las gas mulia (GTAW, las tungsten inert gas). Hal ini dikarenakan

pada baja tahan karat dapat terbentuk karbida batas butir akibat temperatur sensitisasi, demikian juga pada aluminium paduan tidak akan terjadi pengelasan yang sempurna karena lapisan pasif silika yang tersebar merata. Las GTAW dapat mengionisasi alumina yang terbentuk sehingga ikatan metallurgi terbentuk ketika dilas. Contoh-contoh di atas hanya bisa dijawab bagi operator las yang memiliki latar belakang metallurgi yang cukup. Sketsa pengelasan seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Sketsa las

Pengelasan baja tahan karat jenis austenitik tipe 304 atau 316 sering mengalami fenomena sensitisasi, dimana ketika dilas dan saat mendingin pada suhu $300^{\circ}\text{C} \sim 400^{\circ}\text{C}$ terjadi

pengendapan carbida chrom pada daerah batas butir. Unsur chrom yang bersifat meningkatkan ketahanan korosi akibat terikat dengan karbon menjadikan miskin chrom. Fenomena ini disebut dengan korosi batas butir atau grain boundary corrosion. Karbida chrom pada batas butir menjadikan perapuhan pada batas butir dan dapat menyebabkan retak pada batas butir atau intergranular crack.

Baja tahan karat austenitik yang memiliki kadar karbon rendah seperti tipe 304 L atau 316 L akan terhindar dari fenomena sensitisasi dan akan lebih baik bila dilas.

III.7. Kegagalan Akibat Cacat Cor

Cacat material yang diakibatkan oleh kesalahan dalam proses pengecoran seperti adanya rongga udara, pengkerutan dan penyusutan, retak panas, cacat ekot tikus, distorsi dan sebagainya diakibatkan oleh kesalahan dalam proses pengecoran. Pengecoran logam bisa dilakukan secara gravitasi atau dengan tekanan. Untuk komponen yang relatif besar biasanya dilakukan secara gravitasi, sedangkan untuk ukuran yang relatif kecil dan tipis pada umumnya dibuat dengan cor tekan material besi cor biasa menggunakan cor gravitasi

sedangkan logam non fero seperti aluminium paduan untuk produk elemen mesin, seperti piston biasa digunakan metode tekanan. Kualitas cor dengan yang lebih baik, karena pengaruh tekanan dapat mengeleminir cacat cor seperti porisitas dan rongga udara serta lebih padat. Selain itu juga kehalusan permukaan dan kontrol dimensi lebih baik.

Cacat cor lebih banyak ditemukan pada pengecoran cetakan pasir (sand mold casting). Cacat cor pada cetakan pasir bisa disebabkan oleh persiapan cetakan dan pola yang kurang sempurna, kualitas logam cair dan juga dapat pula disebabkan oleh kesalahan dalam perancangan sistem saluran/ desain gating system seperti diameter saluran turun (runner), saluran pembagi, saluran masuk serta saluran penambah (riser).

Perancangan sistem saluran yang benar akan dapat mengurangi kemungkinan cacat yang yang ditimbulkan. Sebagai contoh perancangan cetakan untuk material aluminium dan besi cor memiliki perbedaan dalam ukuran sistem saluran. Sketsa pengecoran logam cetakan pasir.

III.8. Kegagalan Akibat Perlakuan Panas dan Permukaan

Perlakuan panas biasa digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik seperti kekerasan. Sedangkan perlakuan permukaan untuk mengeraskan permukaan, ketahanan leleh atau fatigue, disamping itu untuk meningkatkan unjuk rupa atau (penampilan), seperti perlakuan dengan pelapisan (coating) dan (painting) pada permukaannya.

Komponen mesin yang biasa dikeraskan khususnya pengerasan permukaan seperti pengerasan induksi dan pengerasan nyala, biasa digunakan untuk roda gigi, poros, katub dan lain-lain yang terbuat dari baja karbon medium agar supaya meningkatkan ketahanan aus serta ketahanan leleh komponen. Sedangkan untuk komponen yang terbuat dari baja karbon yang relatif rendah dapat dikeraskan dengan melalui proses kimiawi seperti karburisasi, nitridasi atau karbonitridasi.

Contoh kegagalan pada sepasang roda gigi yang tidak dilakukan pengerasan permukaan sehingga ketahanan ausnya rendah. Disisi lain jika roda gigi terlalu keras maka dapat menyebabkan roda gigi menjadi patah pada akar giginya.

Akibatnya sistem bisa berhenti beroperasi dan menyebabkan kerugian dalam produksi.

Oleh karena itu pengerasan permukaan yang disarankan untuk roda gigi, poros dan lain-lain adalah pengerasan permukaan dengan induksi atau pengerasan nyala yang hanya mengeras permukaan saja sedangkan pada bagian dalam tidak terjadi pengerasan. Kompromi antara keras dan tidak antara permukaan dan bagian dalam akan memerlukan sifat yang baik yaitu meningkatkan ketahanan lelah atau fatigue. Namun mekanisme pengerasan baik pengerasan menyeluruh maupun permukaan pada dasarnya sama saja, hanya saja pengerasan menyeluruh atau full hardening, komponen dipanaskan didalam tungku dengan frekuensi 50 Hz yang dipanaskan secara perlahan sedangkan pengerasan permukaan dilakukan pemanasan secara cepat dengan induksi listrik dengan frekuensi yang tinggi bisa diatas 1000 Hz, sehingga dengan waktu singkat suhu permukaan dapat tercapai untuk memperoleh kekerasan yang meningkat. Jadi baik pengerasan menyeluruh maupun permukaan hanya berbeda pada sumber panasnya saja.

Perlakuan panas dapat berupa quenching, normalizing atau annealing. Ketiga jenis perlakuan tersebut hanya dibedakan pada media pendinginnya yaitu air, udara dan media panas di dalam tungku.

Pada proses quenching baja yang akan dikeraskan harus diketahui persentase karbon yang dimiliki, apabila komposisi karbonnya rendah dibawah 0,2 %, maka baja tersebut sebaiknya diproses dengan pengerasan kimiawi, sebaliknya jika persentase karbonnya relatif tinggi diatas 0,2 % karbon, maka bisa langsung dikeraskan dengan cara quenching.

Sebagai contoh baja karbon medium dengan komposisi karbon 0,5 % dengan fasa α (ferit) + P (perlit) dipanaskan dalam tungku mencapai suhu austenit $T_{\gamma} + 100^{\circ}\text{C}$ di atas garis A_1 . Kemudian ditahan beberapa waktu untuk menghomogenkan suhu produk yang dikeraskan, lalu didinginkan secara cepat dengan mencelupkan ke dalam media pendingin air sehingga fasa yang keras yang disebut fasa Martensit. Untuk tepatnya fasa apa yang terbentuk sebaiknya dilihat pada diagram TTT (temperatur-time-transformasi).

Untuk baja dengan komposisi karbon yang lebih tinggi seperti baja eutektoid (0,83 % C) dan baja karbon tinggi hypereutektoid diatas 0,83 % C, maka fraksi yang terbentuk hasil quenching diatur oleh diagram TTT eutektoid dan hypereutektoid.

Dalam analisis kegagalan sering ditemui dilapangan seperti kesalahan dalam pemilihan bahan, dimana komponen yang seyogyanya terbuat dari baja karbon medium, namun dibuat dari baja karbon rendah, sehingga proses pengerasannya tidak terjadi. Sering juga terjadi kesalahan dalam proses pengerasan pada saat pemanasan, dimana temperatur pemanasan tidak mencapai suhu austenit, sehingga martensit yang dihasilkan tidak begitu sempurna. Atau pemanasan terlalu tinggi atau terlalu lama ditahan, hal ini dapat menyebabkan butir menjadi berukuran besar, sehingga kekuatan menjadi turun.

III.9. Kegagalan Akibat Cacat Pembentukan

Pembentukan logam adalah proses deformasi plastis pada logam dalam proses manufaktur. Pembentukan logam

dapat berawal dari bloom, billet, dan slab ataupun pembentukan pelat tipis.

Pembentukan logam dapat secara panas (hot working) atau dingin (cold working). Pembentukan panas dilakukan untuk komponen yang memiliki luas spesifik yang tinggi. Temperatur yang disarankan untuk pembentukan panas berkisar pada temperatur rekristalisasi sebesar $0,4 \sim 0,5 \times$ Temperatur Cair (K).

Tujuan pengerjaan panas adalah dapat mengurangi energi pembentukan dibandingkan pengerjaan dingin. Cacat yang sering terjadi pada pengerjaan panas adalah retak panas atau hot tears sedangkan retak dingin terjadi pada proses pengerjaan dingin.

Beberapa contoh pengerjaan panas seperti rol panas, ekstrusi, tempa panas. Sedangkan pengerjaan dingin seperti pembentukan pelat tipis, rol dingin, tempa dingi, penarikan kawat dan lain-lain.

III.10. Kegagalan Akibat Perakitan

Perakitan yang salah atau salah pasang dapat menimbulkan masalah dan dapat menimbulkan dampak yang

fatal. Sebagai contoh pemasangan kabel listrik yang salah dapat menyebabkan timbulnya percikan api dan akhirnya terbakar.

Soal Latihan :

1. Jelaskan modulus kegagalan yang anda ketahui ?
2. Jelaskan mengenai modulus kegagalan fatigue? Apa cirinya ?
3. Jelaskan modulus korosi dan klasifikasinya?
4. Apa yang dimaksud dengan stress corrosion cracking?
5. Beri contoh kerusakan akibat pemrosesan yang tidak sempurna beserta gambar?
6. Jelaskan cacat akibat cor?
7. Jelaskan kerusakan akibat proses perlakuan panas yang salah beserta contoh ?

Umpan Balik dan Tindak Lanjut :

Mahasiswa memahami mengenai modulus kerusakan beserta perbedaan dan cirinya.

Daftar Pustaka :

ASM Handbook,2002, Failure analysis and prevention, vol X1, Amazon, NewYork.

ASM Handbook,2002, Fractography, vol XII, Amazon, NewYork.

Broek,D, 2012. Elementary Engineering Fracture Mechanics. 3th revised edition, Martinus Nijhoff publishers. Boston/London.

C.Brooks, A.Choudhury, C.R.Brooks,2001, Failure analysis of engineering material,1st edition, McGraw-Hill Book company, New York.

Daftar Kata Penting :

Modus	: Tipe
Fatigue	: Lelah
SCC	: Stress corrosion cracking
Fretling	: Gabungan getaran dan kontak
Radius fillet	: Jari jari fillet
Shrinkage	: Pengkerutan
Void	: rongga udara
Hot tears	: robek panas
HAZ	: Heat affected zone

BAB IV. PENYEBAB KEGAGALAN

Modus kegagalan seperti diterangkan sebelumnya tentu ada penyebabnya. Ada penyebab dan ada dampaknya. Penyebab kegagalan dapat dikategorikan disebabkan karena

1. Kesalahan dalam pemilihan bahan
2. Kesalahan dalam desain
3. Kesalahan dalam perawatan
4. Kesalahan operator
5. Kesalahan dalam pengiriman
6. Kesalahan dalam penyimpanan.
7. Kesalahan akibat kondisi alam

IV.1. Kesalahan dalam pemilihan Material

Material yang digunakan dalam suatu komponen mesin harus tepat standarnya sesuai dengan kondisi operasi yang dialami oleh material tersebut. Pemilihan material harus diperhatikan masalah ketersediaan, biaya dan kondisi operasinya. Tanpa memperhatikan aspek di atas dapat menyebabkan kesalahan material sehingga menyebabkan

kegagalan. Sebagai contoh sepasang roda gigi harus terbuat dari baja karbon sedang JIS S 45 C atau AISI1050. Alasannya karena baja karbon sedang dapat dikeraskan permukaan untuk meningkatkan ketahanan gesekan dengan pengerasan induksi. Jadi roda gigi akan tahan gesekan antara gigi penggerak dan yang digerakkan. Disamping itu pula dengan perlakuan permukaan dapat meningkatkan ketahanan lelah material terhadap beban bolak balik.

Contoh lain material untuk kegunaan pada daerah atau media yang korosif, maka sebaiknya dipilih material baja tahan karat. Baja tahan karat adalah baja yang memiliki unsur chrom yang tinggi diatas 12 persen. Baja tahan karat terbagi menjadi baja tahan karat austenitik, feritik, martensitik dan duplek. Salah satu jenis baja tahan karat yang terkenal adalah baja tahan karat 18-8 yang artinya mengandung 18 persen chrom dan 8 persen nikel. Ciri dari baja tahan karat austenitik adalah non magnetik bila didekatkan dengan magnet.

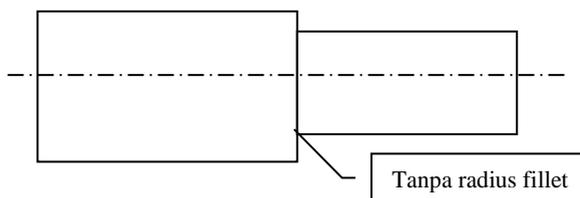
Material yang digunakan pada kondisi temperatur tinggi seperti turbin gas akan mengandung kadar nikel yang tinggi, seperti material Sudu turbin gas. Kegagalan yang sering

terjadi pada sudu turbin gas berupa creep atau stress rupture. Creep terjadi karena gaya sentrifugal yang lama.

Material yang digunakan untuk menahan gesekan serta benturan seperti material buldozer, alat berat batubara, mata bor sebaiknya mengandung kadar Mn atau manganese .

IV.2 Kesalahan Dalam Desain

Didalam perancangan komponen mesin sering juga ditemui terjadi kesalahan dalam perancangan sehingga dapat memperpendek umur pakai material. Sebagai contoh perancangan poros bertingkat, dimana radius fillet sangat berperan didalam memperpanjang umur pakai. Berbeda dengan poros bertingkat yang tanpa radius fillet akan menimbulkan konsentrasi tegangan, yang pada akhirnya dapat memicu awal retak. Untuk lebih jelasnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Contoh desain salah pada poros bertingkat

IV.3 Kesalahan Dalam Perawatan

Perawatan rutin, perawatan berkala dan overhaul perlu dilakukan agar supaya umur pakai alat menjadi lebih baik, sekaligus mengetahui daerah-daerah yang mengalami kerusakan secara visual. Perawatan harus dilakukan secara konsisten baik yang sifatnya pencegahan maupun perbaikan.

Contoh yang amat sederhana penggantian oli mesin kendaraan bermotor yang seyogyanya dilakukan setiap 5000 km harus dipatuhi agar supaya komponen-komponen di dalam mesin tidak mengalami gesekan yang signifikan.

IV.4 Kesalahan Operator

Kegagalan komponen mesin bisa juga disebabkan oleh kesalahan oleh operator atau pengguna. Operator dalam hal ini dapat juga berupa pilot, nakhoda atau supir yang mengoperasikan atau para operator mesin industri atau pabrik.

Jika para operator tidak melaksanakan pekerjaannya sesuai dengan standar operasi prosedur (SOP), maka kegagalan bisa terjadi. Sebagai contoh seorang tukang las yang melaksanakan pengelasan dengan tidak memiliki sertifikat las, maka bila terjadi kegagalan disebabkan oleh kesalahan

operator oleh operator itu sendiri. Contoh lain seorang pilot yang mengendalikan pesawat dalam keadaan mabuk, maka hal seperti itu disebut kesalahan operator atau sering disebut dengan human eror.

IV.5 Kesalahan Dalam Pengiriman

Kegagalan komponen mesin dapat saja terjadi secara dini ketika komponen yang baru dikirim ke lokasi. Jika pengirimannya tidak sesuai prosedur maka akan terjadi kerusakan. Sebagai contoh sebuah poros turbin uap mengalami kegagalan dan perlu diganti. Maka pengirimannya sesuai dengan prosedur, jika tidak maka poros tersebut akan mengalami kebengkokan atau defleksi yang besar, sehingga tidak bisa digunakan kembali.

IV.6. Kesalahan Dalam Penyimpanan

Kegagalan komponen berupa kerusakan dapat terjadi dikarenakan prosedur penyimpanan yang salah. Komponen-komponen cadangan biasanya disimpan di dalam gudang penyimpanan tanpa memperhatikan lingkungannya apakah bersifat asam atau korosif atau tidak. Lingkungan yang asam

yang memiliki pH dibawah tujuh beresiko bersifat korosif terhadap baja. Demikian juga lingkungan yang lembab dapat juga memicu korosi dikarenakan kadar air udara sekitar yang tinggi. Oleh karena itu faktor penyimpanan sangatlah penting pada komponen-komponen mesin yang disimpan agar supaya tidak terjadi kerusakan sebelum digunakan.

Biasanya untuk menyimpan komponen-komponen yang vital pada suatu ruangan udara yang terkondisi, hal ini bertujuan untuk mengurangi kelembaban udara. Udara yang lembab dapat memicu terjadinya korosi.

ASM Handbook,2002, Failure analysis and prevention, vol X1, Amazon, NewYork.

ASM Handbook,2002, Fractography, vol XII, Amazon, NewYork.

Broek,D, 2012. Elementary Engineering Fracture Mechanics. 3th revised edition, Martinus Nijhoff publishers. Boston/London.

C.Brooks, A.Choudhury, C.R.Brooks,2001, Failure analysis of engineering material,1st edition, McGraw-Hill Book company, New York.

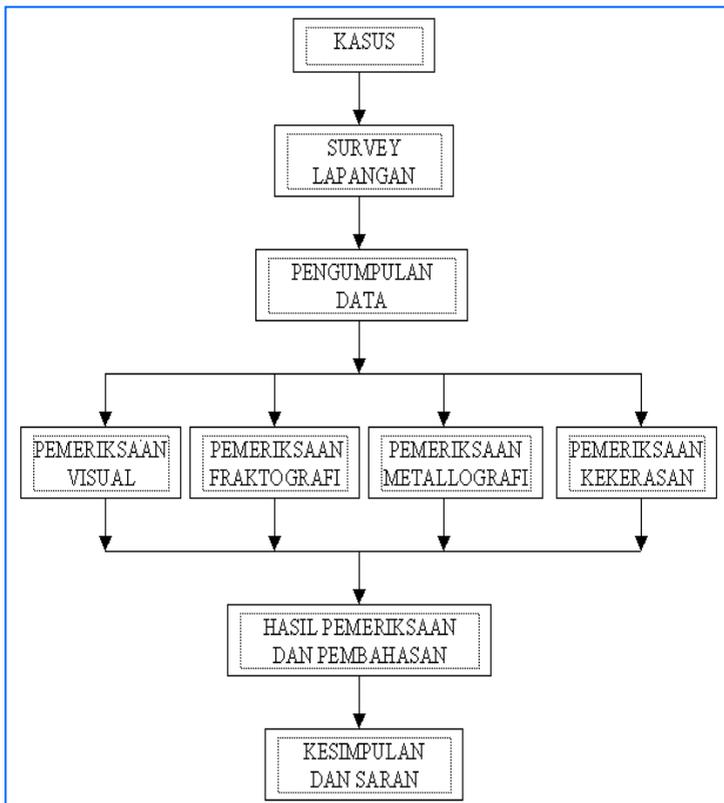
Daftar Kata Penting :

Maintenance	: perawatan
SOP	: standar prosedur operasi
Unproperly design	: Desain tak sempurna

BAB V. METODE ANALISIS

Dalam menganalisis suatu kegagalan atau kerusakan dibutuhkan sikap profesional didalam menelaah suatu kegagalan, sehingga mampu mengungkap modus dan penyebab kegagalan. Untuk dapat membuktikan modus dan penyebab kegagalan dibutuhkan suatu metode yang terukur yang dapat dipertanggungjawabkan.

Alur dari kegiatan didalam melacak modus dan penyebab kegagalan ditunjukkan pada diagram pada Gambar 3.



Gambar 4. Alur kegiatan dalam analisis kegagalan

Metoda dalam menganalisis dapat dilakukan Secara analitis, eksperimental, numerikal dan bahkan gabungannya tergantung tingkat kesulitan permasalahannya. Seseorang yang telah profesional didalam menganalisis kegagalan terkadang mereka telah dapat memprediksi modus dan kerusakan yang terjadi secara dini, Sebaliknya seseorang yang belum profesional mereka membutuhkan kajian-kajian yang panjang terlebih dahulu, barulah dapat disimpulkan modus dan penyebab kegagalan. Kemampuan didalam menganalisis kegagalan diperoleh dari pengalaman seseorang analist, semakin sering mereka menganalisis semakin meningkat kemampuan dalam menganalisa. Ada istilah ala bisa karena biasa. Seseorang Analist membutuhkan modal dalam ilmu material, kemampuan dalam eksperimen laboratorium dan bahkan kemampuan dalam analisis numerik seperti pemodelan, optimasi, metode elemen hingga, yang dikomparasi dalam analitis.

Tahapan dalam analisis mulai dari survey lapangan pada lokasi kejadian kegagalan, Pengumpulan data, Pengujian

dan Pemeriksaan, Mengkaji dan membahas hasil pengujian dan pemeriksaan, menarik kesimpulan serta membrikan saran atau rekomendasi agar supaya kegagalan dengan modus yang sama tidak terulang kembali, sehingga dapt beroprasi kembali dengan umur pakai yang lebih baik.

V.1 Survey Lapangan

Survey kelokasi kejadian sangat dibutuhkan untuk melihat secara langsung kejadian kerusakan. Hasil survey ini membantu sekali serta mendukung data awal sebagai data visual. Pada saat survey dibutuhkan alat pendukung seperti kamera yang daya resolusinya yang baik untuk mendapatkan hasil yang baik yang akan digunakan sebagai data awal.

V.2 Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data diperlukan baik data primer maupun sekunder. Data primer dapat diperoleh dari introgasi kepada operator, teknisi atau orang yang terkait pada masalah tersebut. Sedangkan data sekunder terkait dengan data pendukung seperti data teknis, data gambar teknik, data

material dan lain-lain. Data benda yang mengalami kerusakan serta spesifikasinya sangat dibutuhkan dan diamankan agar supaya tidak mengalami kerusakan yang lebih jauh seperti benturan, gesekan dan korosi. Permukaan yang mengalami kegagalan tidak boleh diganggu dan dalam keadaan original agar supaya tidak membingungkan dalam menganalisis.

V.3 Pengujian dan Pemeriksaan Laboratorium

Pengujian dan pemeriksaan awal yang dibutuhkan adalah tergantung dari tingkat kesulitan dari kasus kegagalan yang dialami. Tidak jarang bagi analist yang sudah profesional tidak perlu membutuhkan pengujian dan pemerikasaan yang terlalu banyak, seperti dari pemeriksaan visual saja sudah dapat diketahui modus kerusakan.

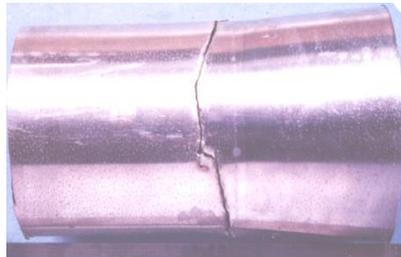
Tahapan dari pengujian dan pemeriksaan adalah sebagai berikut.

1. Pemeriksaan visual

Pemeriksaan visual dilakukan dengan mata telanjang, memakai loop, stereo mikroskop atau menggunakan kamera. Pemeriksaan ini berusaha untuk mencari indikasi-

indikasi modus kegagalan seperti adanya korosi, retak, lubang, aus, penipisan . tebal, perubahan warna, deformasi, beachmark (ciri fatigue), kesalahan didalam manufaktur, las dan lain-lain yang tampak dan dapat dilihat dengan kasat mata.

Pemotretan pada lokasi yang memicu terjadinya konsentrasi tegangan sebaiknya difoto secara jelas agar supaya menjadi data awal dalam proses investigasi. Contoh pemeriksaan visual seperti pada Gambar.....





Gambar.... tube baja tahan karat 316 L

Pada Gambar di atas terlihat sebuah tube yang terbuat dari baja tahan karat 316 L yang mengalami patah. Pada gambar visual juga tampak sebuah lubang kecil sebagai pemicu terjadinya awal retak, kemudian merambat dan akhirnya patah menjadi dua bagian.

2. Pemeriksaan komposisi kimia

Pemeriksaan komposisi bertujuan apakah komponen pemilihan material pada saat rancang bangun. Jika komposisi kimia tidak sesuai dengan material yang direkomendasikan maka dikatakan terjadi kesalahan

material. Pemilihan material yang cocok terkait juga dengan komposisi kimia yang dimiliki oleh komponen tersebut. Sebagai contoh material yang digunakan untuk mengoprasikan media yang korosif, maka komposisi yang penting adalah unsur khrom, sedangkan material yang digunakan untuk komponen yang beroperasi pada temperatur tinggi maka unsur nikel sangat dibutuhkan. Demikian juga material yang digunakan untuk pengeruk atau mata bor harus memiliki kadar mangan yang cukup agar supaya tahan gesekan.

3. Pemeriksaan fraktografi

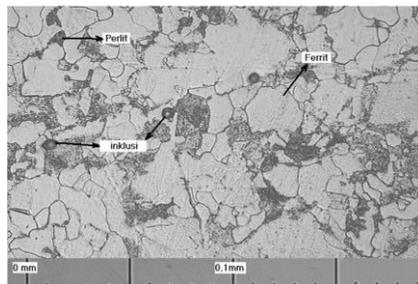
Pemeriksaan fraktografi maksudnya adalah memeriksa bagian yang mengalami patah atau retak, dengan melakukan pengambilan gambar permukaan patahnya. Hal ini dapat dilakukan dengan cara stereografi (tiga dimensi), Scanning elektron mikroskop (SEM). Hasil dari pemeriksaan ini diharapkan dapat diketahui awal patahan dan perambatan retak.

4. Pemeriksaan metalografi

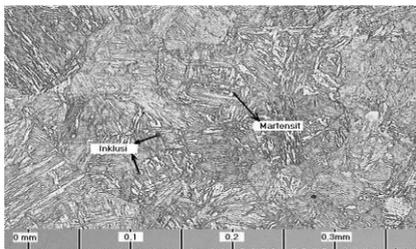
Pemeriksaan metalografi sering disebut pemeriksaan struktur mikro dan struktur makro dari benda uji yang

mengalami kegagalan. Pada pemeriksaan struktur mikro bertujuan untuk mengidentifikasi fasa-fasa yang tersusun pada benda uji yang mengalami kegagalan. Oleh karena itu diagram fasa atau diagram kesetimbangan perlu dipahami. Sebagai contoh diagram fasa baja dan besi cor yang disebut diagram fasa biner Fe-Fe₃C. Ada kalanya dibutuhkan diagram fasa terner atau quartener.

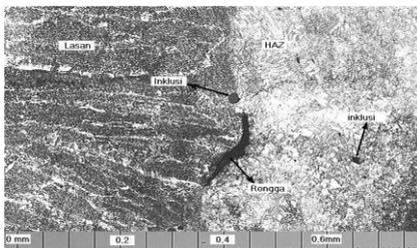
Contoh struktur mikro baja Aisi 4340 yang mengalami proses las, dimana kadar karbon sebanyak 0,4 persen



Gambar 5. Struktur mikro baja karbon rendah.(600x)



Gambar 6. Baja karbon tinggi dengan retak



Gambar 7. Retak pada daerah las

Fasa suatu logam akan berubah bila terjadi perubahan suhu yang signifikan, namun komposisi kimianya tidak terjadi perubahan. Bila terjadi perubahan suhu yang signifikan pada benda uji seperti adanya proses pengelasan, perlakuan panas dan permukaan, maka akan terjadi perubahan sifat mekanis seperti kekerasan, kekuatan, keuletan dan ketangguhan. Perubahan sifat mekanis

akibat suhu dapat berdampak positif, namun dapat pula berdampak negatif.

5. Pengujian sifat mekanis

Pengujian sifat mekanis yang perlu dilakukan tergantung kasus dan kondisi kerja alat yang mengalami kegagalan. Pengujian yang biasa digunakan adalah pengujian tarik, uji kekerasan. Jika beban yang bekerja beban dinamis maka perlu juga dilakukan uji lelah atau uji impak.

Pengujian mekanis pada dasarnya untuk mendapatkan informasi mengenai sifat mekanik dan digunakan untuk komparasi terhadap spesifikasi komponen yang direkomendasi pada saat perancangan. Jika hasil pengujian mekanis tidak sesuai dengan spesifikasi, maka bisa dikatakan sebagai kesalahan dalam pemilihan material.

6. Pemeriksaan dengan NDT

Pemeriksaan dengan tidak merusak dilakukan untuk mencari cacat-cacat sebagai pemicu keretakan yang tersembunyi dan tidak bisa dilihat dengan kasat mata. Cacat-cacat ini disebabkan oleh cacat akibat proses produksi seperti las, cor, perlakuan panas, pembentukan dan lain-lain. Cacat dikategorikan cacat permukaan dan cacat dalam. Cacat permukaan seperti retak halus permukaan, porisita, undercut dan lain-lain. Sedangkan cacat dalam seperti adanya blowholes, blister, retak dalam serta diskontinuitas lainnya.

Untuk cacat permukaan biasa digunakan pemerikasan dye pentrant, magnafluks. Sedangkan untuk cacat dalam biasa digunakan pemeriksaan ultrasonik, x-ray, edy current. Dari pengujian dan pemeriksaan dapat diperoleh indikasi cacat serta proses yang dialami, sehingga dapat membantu dalam penentuan modus kegagalan.

Pengujian lain yang bila diperlukan adalah analisis numerik dengan metode elemen hingga sebagai komparasi antara solusi analitis dan numerik. Namun tidak semua jenis pengujian dan pemeriksaan di atas harus dilakukan tetapi sesuai dengan kebutuhan untuk dapat menarik kesimpulan modus apa yang terjadi pada kegagalan tersebut.

V.4 Analisis dan Pembahasan

Data yang dikumpulkan pada waktu survey dan pengumpulan data baik data primer maupun sekunder digunakan untuk memperkuat hasil pengujian dan pemeriksaan laboratorium.

Data dan hasil pengujian dan pemeriksaan laboratorium dikaji secara mendalam dan didiskusikan. Hasilnya dispesifikan dan difokuskan kepada modus apa yang terjadi, sekaligus didapat penyebab kegagalan.

V.5 Menarik Kesimpulan dan Saran

Hasil dari analisis dan pembahasan dapat ditarik beberapa kesimpulan terkait dengan modus kegagalan serta penyebab kegagalan.

Hasil kesimpulan berupa modus dan penyebab kegagalan harus diberi saran atau rekomendasi agar supaya modus dan penyebab kegagalan yang sama tidak terulang kembali sehingga umur pakai menjadi meningkat.

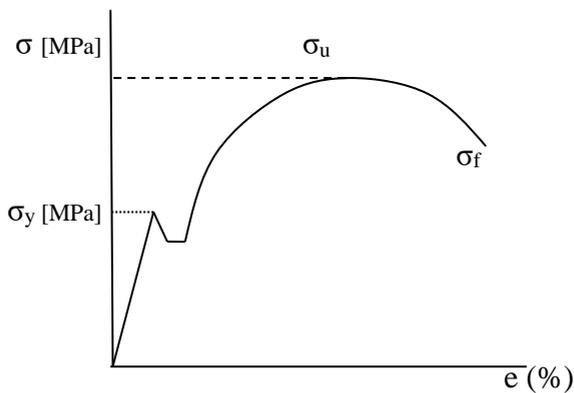
BAB VI. PENGUJIAN DAN PEMERIKSAAN

Didalam menganalisis suatu kegagalan Pengujian dan pemeriksaan laboratorium sangat diperlukan, tanpa pengujian dan pemeriksaan sulit untuk menentukan modus dan penyebab kegagalan secara pasti. Pengujian dan pemerikaan dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu Pengujian merusak dan pengujian tidak merusak. Istilah pengujian merusak biasa digunakan untuk pengujian mekanik seperti pengujian kekuatan tarik, pengujian tekan, pengujian lentur, pengujian puntir, pengujian dampak, pengujian fatigue, dan pengujian kekerasan. Jenis pengujian ini biasanya benda uji mengalami kerusakan.

VI.1 Pengujian Tarik

Pengujian tarik bertujuan untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik material σ_u [MPa]. Selain itu dapat juga diketahui kekuatan luluhnya σ_y [MPa] dan kekuatan putus σ_f [MPa]. Pada bidang Teknik Mesin kekuatan tarik sangat penting diketahui didalam perancangan mesin, terutama pada perancangan pada beban statis. Pengujian tarik biasanya

digambarkan pada kurva hubungan tegangan dan regangan. Dalam kurva tegangan versus regangan juga dapat diketahui keuletan material e [%], kekakuan E , dan ketangguhan yang ditunjukkan dari luas permukaan di bawah kurva seperti pada Gambar 4.



Gambar 7. Kurva $\sigma - e$

. Pengujian material yang kuat akan ditunjukkan pada posisi kurvanya yang tinggi sedang material lunak kurvanya akan rendah. Demikian juga material yang ulet nilai e (%) nya besar, sedang material yang rapuh/getas kurvanya pendek saja atau nilai e (%) nya kecil.

Untuk material yang ulet benda ujinya akan menampakan necking atau pengecilan penampang sebelum material tersebut putus sedangkan material yang rapuh necking hampir tidak ada.

VI.2 Pengujian Tekan

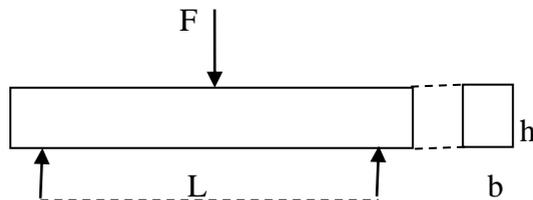
Pada pengujian tekan, kekuatan tekan material di asumsi sama dengan kekuatan tarik dengan arah yang berbeda. Sesungguhnya kekuatan tekan tidak tepat sama dengan kekuatan tarik. Namun dalam aplikasinya sering diasumsi sama. Pengujian tekan sering digunakan banyak pada disiplin ilmu Teknik Sipil pada perancangan struktur bangunan dan jembatan, dimana perlu diketahui nilai kekuatan balok tekannya.

VI.3 Pengujian Lentur

Pengujian lentur dilakukan untuk mengetahui kekuatan lentur suatu balok atau batang. Pada pengujian ini defleksi maksimum dapat diketahui.

Variable didalam tegangan lentur adalah momen lentur, dimensi dan momen inersia penampang yang mengalami pembebanan.

Untuk kondisi lenturan, Hukum Hooke menjadi acuan didalam keamanan komponen atau konstruksi. Jika Hukum Hooke di lampai maka deformasi plastis terjadi atau defleksi yang terjadi sudah melampaui batas ambang. Keadaan seperti sudah tidak aman dan dikatakan bahwa sudah mengalami kegagalan atau kerusakan. Sketsa pengujian lentur seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Sketsa uji lentur

Tegangan yang lentur yang terjadi pada batang dengan penampang segi empat yang dibebani gaya terpusat F dengan bentang L dapat diformulasikan sebagai berikut.

$$\sigma_b = (M_l \times y)/I_{xy}$$

dimana .

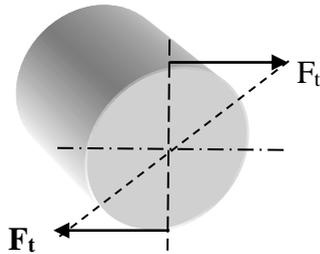
M_l adalah momen lentur

y adalah $\frac{1}{2} h$

I_{xy} adalah momen inersia cartesian = $(bxh^3)/12$

VI.4 Pengujian Puntir

Pengujian puntir atau torsi biasa digunakan untuk benda uji yang berbentuk silindris pejal ataupun berongga. Pengujian puntir terutama digunakan untuk material yang keras atau tidak terlalu ulet. Material yang ulet tentu memiliki sudut puntir yang besar, oleh karena itu untuk material yang ulet kurang cocok untuk diuji puntir. Sketsa pengujian puntir seperti ditunjukkan pada Gambar 6, dimana salah satu ujung ditetapkan dan ujung yang lain diberi kopel gaya.



Gambar 9. Sketsa uji puntir

Tegangan puntir yang terjadi dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\tau_p = (M_p \times r) / I_p$$

dimana :

τ_p adalah tegangan puntir

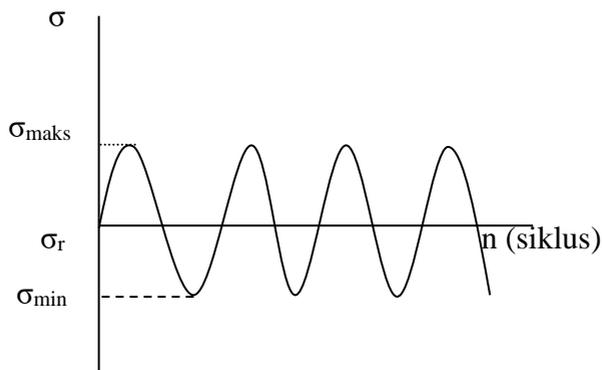
M_p adalah momen puntir

I_p adalah momen inersia polar

VI.5 Pengujian Lelah

Pengujian lelah atau fatigue untuk mengetahui ketahanan lelah atau endurance limit suatu material. Pengujian ini termasuk pengujian dinamis yang dicirikan

dengan pembebanan yang bolak balik. Kondisi pembebanan pada uji fatigue masih dalam kondisi elastis di bawah tegangan luluh material seperti ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 10. Kurva tegangan vs siklus

Keterangan :

σ_r = Tegangan rata-rata =

σ_a = Tegangan amplitudo =w

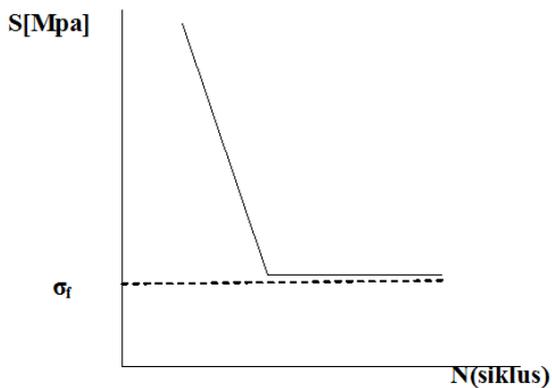
σ_{maks} = Tegangan maksimum

σ_{min} = Tegangan minimum

R = rasio tegangan

n = siklus

Secara empiris nilai ketahanan lelah untuk baja sekitar 0,34 diuji di laboratorium dengan mendapatkan kurva hubungan tegangan dan siklus atau kurva S- N yang disebut dengan kurva Wohler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 11. Diagram Wohler

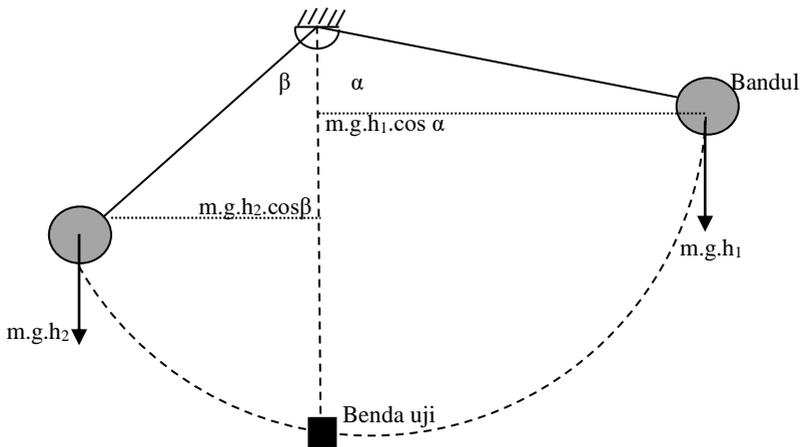
VI.6 Pengujian Impak

Pengujian impact termasuk pengujian dinamik dimana pembebanan dilakukan secara tiba-tiba. Perbedaan energi potensial pada saat sebelum atau sesudah terjadi impact merupakan nilai ketahanan impact. Pengujian impact lebih diperuntukan untuk logam fero seperti baja, hal ini dikarenakan baja memiliki sel satuan kubus pusat badan (BCC) yang memiliki karakteristik mudah slip pada bidang slip dibandingkan logam non fero seperti Aluminium dan tembaga yang memiliki sel satuan kubus pusat muka (FCC).

Baja yang ulet yang memiliki ketangguhan yang baik akan menjadi tidak tangguh dan bahkan rapuh bila mengalami tiga hal sebagai berikut.

1. Dikenai beban tiba-tiba atau impact
2. Dikenakan pada suhu rendah di bawah nol derajat Celcius (cryogenic)
3. Terdapat cacat berupa notch

Pengujian impact terbagi dua jenis yaitu tipe Charpy (posisi benda uji horisontal) dan Izod (posisi benda uji vertikal). Kedua jenis perinsipnya sama cuma posisi benda uji saja yang berbeda. Sketsa pengujian ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Pengujian impak Charpy

Tujuan pengujian impak adalah untuk mengetahui temperatur transisi baja yang diuji impak. Temperatur transisi adalah temperatur yang menunjukkan perubahan sifat antara ulet dan getas.

Dari fenomena yang dialami baja di atas maka perlu berhati-hati sekali untuk komponen mesin atau konstruksi yang terkena temperatur minus akibat berakibat fatal jika dibebani. Sebagai contoh jembatan yang berada pada suatu

negara yang beriklim salju, ketika musim dingin, maka jembatan harus dihentikan dan tidak boleh dilewati semasa musim dingin. Hal ini dikarena konstruksi bajanya akan mengalami penggetasan dan sangat berbahaya.

VI.7 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan bertujuan untuk mengetahui tingkat kekerasan benda uji. Kekerasan merupakan ketahanan terhadap deformasi plastis. Material yang keras biasanya diikuti oleh ketahanan aus yang baik. Material komponen mesin biasanya terbuat dari baja karbon dan memiliki ketahanan aus yang baik seperti roda gigi, poros, baut dan lain-lain. Semakin tinggi kadar karbon maka semakin keras baja tersebut. Untuk komponen mesin baja karbon sedang direkomendasikan untuk digunakan.

Pengujian kekerasan yang biasa digunakan adalah dengan metode tekanan dengan indentor. Beberapa metode yang biasa digunakan adalah sebagai berikut.

1. Metode Brinnel (BHN)

Metode pengujian dengan menggunakan indenter bola baja yang berdiameter 10 mm ditekankan ke permukaan benda uji.

2. Metode Rockwell (Ra, Rb,Rc)

Metode Rockwell menggunakan indenter kerucut intan yang ditekankan ke permukaan benda uji.

3. Metode Vickers (VHN)

Metode pengujian kekerasan Vickers menggunakan indenter berupa piramida intan yang ditekankan ke permukaan benda uji.

Ketiga metode pengujian kekerasan di atas pada dasarnya sama saja, namun ada kelebihan dan kekurangannya.

Pengujian tidak merusak biasanya disebut juga dengan pemeriksaan. Pemeriksaan biasanya dilakukan tanpa merusak seperti radiografi/ x-ray, difraksi, pemeriksaan dye penetrant, pemeriksaan ultrasonik, pemerisaan dengan magnafluks serta pemeriksaan dengan arus Edy. Pemeriksaan lain yang diperlukan juga dan tidak kalah pentingnya adalah pemeriksaan struktur mikro dan struktur makro. Pemeriksaan struktur mikro

terkait dengan pemeriksaan fasa-fasa yang terbentuk pada material tersebut, contoh pada baja adanya fasa ferit (α), perlit (P) dan sementit (Fe_3C), sedangkan pemeriksaan makro terkait dengan pemerikasan struktur makro seperti adanya garis alir/flowlines pada ulir baut, inklusi dan lain-lain.

Pemeriksaan struktur mikro berguna dalam mencocokkan jenis material yang digunakan. Apakah jenis material yang digunakan sudah sesuai dengan spesifikasi serta kondisi operasinya.

VI.8 Pemeriksaan radiografi

Pemeriksaan radiografi yang disebut dengan pemeriksaan dengan menggunakan x-ray dilakukan untuk mengetahui cacat dalam yang ada pada logam. Sinar X adalah sinar dengan spektrum gelombang pendek ditembakkan.

Metode radiografi mempunyai daya penetrasi dan penyerapan dari radiasi sinar-x dan sinar γ (gamma), yang dapat digunakan untuk memeriksa berbagai macam produk antara lain sambungan las, pengecoran, penempaan dan lain-lain. Metode ini dengan menembakan sinar radiasi, berdasarkan adanya perbedaan absorpsi sinar radiasi yang

menembus benda uji, antara bagian yang cacat atau diskontinuitas dengan bahan di sekitarnya. Perbedaan absorpsi tersebut disimpan di media perekam bayangan dalam bentuk film.

Pemeriksaan adanya cacat dilakukan dengan mengamati bentuk bayangan. Dalam menganalisa bayangan, seperti bentuk/ukuran sumber radiasi, bentuk/ukuran cacat dan posisi cacat terhadap sumber radiasi dan film yang menangkap bayangan tersebut. Metode ini memerlukan teknisi yang berpengalaman serta sinar radiasi berbahaya bagi manusia.

VI.9 Pemeriksaan Dye Penetrant

Pemeriksaan dye penetrant banyak digunakan dikarenakan biaya yang relatif murah yang digunakan untuk pemeriksaan cacat permukaan pada logam, plastik atau keramik. Pemeriksaan ini digunakan untuk mendeteksi cacat cor, tempa, las retak halus, dan porositas permukaan.

Pemeriksaan ini menggunakan cairan penerant dan pengembang, dimana permukaan yang sudah siap untuk diperiksa disemprot atau di celup atau di usapkan ke permukaan. Setelah terjadi penetrasi, penetrant yang lebih di

hilangkan dan dilanjutkan dengan menyemprot cairan pengembang. Cairan pengembang membantu menarik penetrant keluar dari cacat, sehingga memperjelas bagian yang diperiksa yang tidak tampak menjadi tampak. Pemeriksaan dapat dilakukan di bawah sinar ultraviolet.

VI.10 Pemeriksaan Ultrasonik

Pemeriksaan cacat dalam yang sering juga digunakan dalam menganalisis kegagalan dengan memanfaatkan gelombang suara ultra ke permukaan logam . Gelombang suara dipancarkan ke permukaan logam akan memantul kembali dan dikonversi dalam bentuk intensitas suara. Jika terdapat cacat yang dilalui seperti rongga udara, retak, maka intensitas gelombang yang ditampilkan akan mengalami gangguan dan dapat diindikasikan adanya cacat dalam.

VI.11 Pemeriksaan dengan Pemagnitan

Pemeriksaan dengan pemagnitan atau dengan istilah magnafluks dilakukan untuk pemeriksaan cacat permukaan atau sedikit di bawah permukaan logam benda uji yang

diperiksa. Metodenya dengan media pasir halus yang ditaburkan ke permukaan yang akan diperiksa. Kemudian logam dialiri magnet, sehingga pasir akan mengikuti orientasi arus magnet secara teratur. Jika terdapat cacat atau diskontinuitas maka garis alir pasir akan terdistorsi. Daerah yang terdistorsi tersebut dapat diindikasikan terdapat cacat permukaan.

VI.12 Pemeriksaan Arus Eddy

Pemeriksaan dengan memanfaatkan arus Eddy biasa dilakukan untuk memeriksa ketebalan lapisan pada permukaan logam, seperti cat, ketebalan pelapis serta mendeteksi adanya retak.

Suatu kumparan dialiri arus bolak balik akan menghasilkan suatu medan magnetik yang diinduksi di dalam material benda uji. Arus eddy menghasilkan suatu medan magnetik yang sekunder yang berlawanan dengan medan magnetik kumparan yang utama. Ketika kumparan itu diletakkan di atas suatu benda uji yang ada cacat, medan magnet yang sekunder disimpangkan, sehingga akan mengubah pemuatan di kumparan. Perubahan di dalam pemuatan

kumparan secara langsung mempengaruhi impedansi kumparan, perubahan-perubahan ini mengindikasikan adanya cacat.

Soal Latihan :

Umpan Balik dan Tindak Lanjut :

Daftar Pustaka :

Daftar Kata Penting :

REFERENSI

- ASM Handbook,2002, Failure analysis and prevention, vol X1, Amazon, NewYork.
- ASM Handbook,2002, Fractography, vol XII, Amazon, NewYork.
- Broek,D, 2012. Elementary Engineering Fracture Mechanics. 3th revised edition, Martinus Nijhoff publishers. Boston/London.
- C.Brooks, A.Choudhury, C.R.Brooks,2001, Failure analysis of engineering material,1st edition, McGraw-Hill Book company, New York.
- Callister,W.D,2006, Material science and engineering, 9th edition, John Willey & Sons,Inc, London.
- Fontana,Mars G,1987, Corrosion engineering, third edition, McGraw-Hill Book company, New York.
- Chandra.H,1994. Analisis kegagalan tube sentrifuge baja tahan karat 316 L, S2 ITB, Bandung.

INDEKS

A

Abrasi
Alumina
Aluminium padua
Amplitudo
Analisis kegagalan
Atom
Austenit
Awal retak

B

Baja karbon
Brinell
BCC
Beach mark
Blister
Blowholes
BHN

C

Cat
Charpy
Cor

D

Deformasi elastis
Deformasi plastis
Diagram fasa
Difraksi
Dye penetrant

E

Edy current
Endurance limit
Energi impak
Electro kimiawi

F

Fasa
Fatigue
FCC
Ferit
Fe₃C

G

Garis alir
Gas mulia
Gelombang suara
GTAW

H

Hidrogen Embrittlement

I

Impak
Izod
Inklusi

K
Karat
Katub
Ketangguhan
Kekerasan
Ketahanan lelah
Komposisi kimia
Korosi
Korosi merata
Korosi galvanik
Korosi celah
Korosi batas butir
Kriteria luluh

L

Las busur listrik
Logam fero
Logam non fero

M

Magnafluks
Martensit

N

Neking
Notch

O

Oksigen
Oksida

P

Patah
Patah akhir

Ph

Perambatanretak
Perlakuan panas
Perlakuan permukaan
Perlit
Penetrasi
Poros
Porisitas
premateur
puntir

Q

Quartener

R

Radiografi
Rockwell
Retak
Roda gigi

S

Scanning electron microscope
Sifat mekanik
Siklus
Simentit
Striasi
Stereo Microscope
Struktur makro
Struktur mikro

Perambatan retak
Patah getas
Patah ulet

T

Tegangan maksimum
Tegangan minimum
Tegangan tarik
Tegangan tekan
Tegangan lentur
Tegangan puntir
Temperatur rekristalisasi
Temperatur Transisi
Tresca

U

Ultrasonik
Umur pakai
Undecut

V

VHN
Vickers
Von Mises

W

Wohler

X

x- ray

GLOSARIUM

Abrasi adalah kerusakan permukaan logam akibat gesekan dari partikel padat akibat aliran dengan kecepatan.

ASTM adalah standarisasi dibidang teknik untuk pengujian yang dikeluarkan oleh Amerika.

Austenit adalah larutan padat karbon pada fero secara interstisi jenuh sebanyak 1,7 persen.

BCC adalah bentuk sel satuan yang berbentuk kubus pusat badan.

Beachmark adalah “garis pantai” yang menyatakan ciri dari rambatan retak lelah atau fatigue.

BHN adalah nilai kekerasan yang didapat dengan metode penekanan dengan menggunakan bola baja.

Blister adalah ciri kerusakan pada logam yang mengalami hidrogen embrittlement.

Delta adalah fero pada suhu tinggi dengan sel satuan BCC

Endurance limit adalah ketahanan lelah suatu baja atau logam fero yang didapat pada diagram Wohler.

Fatigue adalah kelelahan dari suatu material yang terkena beban bolak-balik.

FCC adalah bentuk sel satuan pada logam dimana terdapat atom pada pusat mukanya.

Ferit adalah larutan padat karbon pada logam fero secara interstisi yang larut jenuh sebanyak 0,025 persen.

HAZ adalah suatu daerah yang terpengaruh panas pada logam yang dilas. Pada daerah tersebut terjadi perubahan struktur mikro.

JIS adalah standarisasi untuk material teknik yang dikeluarkan Jepang.

Martensit adalah suatu fasa yang keras dan getas yang terbentuk dari austenit FCC pada suhu tinggi. Martensit bercirikan seperti jarum atau daun bambu yang berserakan.

Perlit adalah fasa dari baja yang merupakan lapisan antara ferit dan sementit.

Rockwell adalah simbol nilai kekerasan yang diperoleh dengan metode penekanan dengan menggunakan indenter kerucut intan.

Sementit adalah senyawa jenuh antara karbon dan fero dimana unsur karbon jenuh pada 6,67 persen.

Striasi adalah ciri rambatan dari patah leleh atau fatigue yang sangat halus dan hanya bisa dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron.

Temperatur rekristalisasi adalah temperatur yang digunakan untuk pengerjaan panas logam.

Temperatur transisi adalah temperatur dimana batas antara ulet dan getas pada pengujian impak.

Tresca adalah salah satu kriteria luluh atau kegagalan terhadap tegangan geser.

Undercut adalah ketidak sempurnaan didalam proses las yang terjadi pada kampuh las yang tidak tepat pada alur las

VHN adalah simbol dalam nilai kekerasan Vickers yang menggunakan indentor piramida intan.

Von mises adalah teori kegagalan atau kriteria luluh terhadap tegangan utama.

Wohler adalah penemu kurva hubungan antara tegangan dan siklus pada uji leleh atau fatigue.

x-ray adalah sinar gelombang pendek yang digunakan dalam mendeteksi cacat dalam pada logam.