

ANALISIS KERUSAKAN POROS POMPA SENTRIFUGAL YANG BEROPERASI DI LINGKUNGAN KOROSIF

Iskandar Azis

Dosen DPK Fakultas Teknik Universitas Almuslim

ABSTRAK

Analisa kegagalan dilakukan pada poros rusak dari suatu pompa sentrifugal, digunakan memindahkan fraksi air dari tanki pemisahan kondensat tahap pertama ke tanki unit pengolahan air di sebuah industri. Berdasarkan informasi yang dikumpulkan dari lapangan, inspeksi dan pengujian laboratorium, dan studi literatur, maka dapat ditentukan bahwa poros pompa ini rusak akibat mekanisme patah fatik rotasi lentur. Beban rotasi lentur (dan cacat permukaan poros juga) terjadi, akibat suaian yang salah dan/atau ketidak-lurusan antara poros dan bantalan. Poros AISI 304 dibuat dengan proses pengecoran, yang memiliki kelemahan struktur, sehingga turut mempromosi cacat mikro. Kombinasi cacat mikro, akibat mekanis dan metalurgis itu, besar kemungkinan menjadi inisiasi retak (takikan). Menurut analisis tegangan, ditemukan bahwa poros bertakik itu tidak aman terhadap patah fatik rotasi lentur; dan demikian, sebaliknya. Karena itu, direkomendasikan halnya untuk menghindari misalignmet, struktur coran, atau material harus diganti dengan grade yang lebih tinggi (misal AISI 316). Di samping itu, program perawatan harus diterapkan sistem tribologi dengan baik.

Kata kunci: Poros Rusak, Kegagalan, Fatik dan Bahan

PENDAHULUAN

Pada suatu konstruksi mesin pompa, poros merupakan salah satu bagian utama yang sangat penting dan berfungsi sebagai media untuk meneruskan daya dan putaran dari motor penggerak ke impeler pompa. Pompa sentrifugal itu, memang didesain untuk beroperasi dalam lingkungan korosif seperti asam sulfur, nitrogen, merkuri, dll. Untuk lingkungan seperti itu, poros pompa yang digunakan biasanya terbuat dari bahan anti-karat tetapi telah mengalami kegagalan pada saat beroperasi, yaitu patah sebelum mencapai umur maksimum.

Selama beroperasi, beban yang diderita poros itu sesuai dengan kriteria operasi pompa dari produsen, *Worthington Pump Corp.*, Ampere Station, East Orange, New Jersey (AS), yaitu meneruskan daya dan putaran sebesar 30 HP (22,4 kW) dan 2965 rpm dengan kapasitas pemompaan 80 cu ft/min. Pompa sentrifugal ini digerakkan dengan elektromotor 40 HP dan 3000 rpm ini buatan *Reliance Electric Company*, Cleveland Ohio (AS). Pada saat beroperasi dengan kondisi beban yang sudah sesuai dengan ketentuan, poros mengalami pertahanan pada posisi di atas bantalan dari

arah rumah pompa. Pada posisi patah itu, tampak di permukaan poros ada lubang cacat. Mekanisme perpatahannya berlangsung cukup cepat, sehingga mengakibatkan volut pompa mengalami kerusakan, sedangkan motor penggeraknya tidak terjadi kegagalan.

Dalam tahun-tahun terakhir, pompa yang beroperasi secara kontinue itu, porosnya sudah empat kali dilaporkan lelah rusak/patah secara beruntun pada posisi yang selalu sama tanpa tindakan pencegahan yang berarti, sebagaimana terekam dalam *controlling card*. Demikian saja, informasi yang diperoleh dari lapangan tentang kegagalan poros tersebut.

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah: (1) untuk menemukan mekanisme kegagalan pada poros pompa yang rusak, penarikan kesimpulan dan pemberian rekomendasi, dan (2) untuk memudahkan perbaikan dan perawatan pompa sentrifugal, sehingga kerusakan poros patah itu dapat diprediksi dan diantisipasi sejak awal operasi pompa sentrifugal.

Kegagalan material paling banyak dialami oleh suatu komponen struktur dan konstruksi mesin. Berdasarkan penelitian

kegagalan material yang telah dilakukan Krupowicz (1994) terhadap 100 kasus kecelakaan utama dapat dimasukkan ke dalam 6 katagori, yaitu kegagalan mekanik 38%, kesalahan operasi 26%, tanpa diketahui penyebab 15%, kesalahan proses 10%, kecelakaan alami 7% dan kesalahan perancangan 4%.

Kenyataannya, semua kegagalan itu dapat dikategorikan sebagai kegagalan mekanik/material dan korosi. Secara kasar, Krupowicz (1994) menemukan bahwa sebab-sebab kegagalan metalurgi dan korosi, masing-masing 54% dan 42%; sedangkan sisanya merupakan interaksi antara keduanya.

Untuk mengetahui akar sebab-sebab kegagalan material, maka perlu dilakukan suatu penelitian dan analisis secara seksama. Menurut Wulpi (1990), analisis kegagalan merupakan suatu proses yang rumit yang melibatkan beberapa partisipasi. Mereka sering harus bekerja seperti detektif yang mencoba menyelesaikan suatu misteri. Ada lima langkah utama dalam proses analisis kegagalan, yaitu: (1) analisis kegagalan di lapangan, (2) analisis kegagalan di laboratorium, (3) laporan analisis kegagalan, (4) implementasi rekomendasi, dan (5) tindak-lanjut. Analisis kegagalan di lapangan seringkali dapat dilakukan hanya pemeriksaan visual, sedangkan di laboratorium harus melibatkan peralatan khusus untuk setiap kasus yang relevan/dicurigai.

Untuk suatu sistem rotasi (poros) dari elemen mesin, menurut Rolfe dan Balsom (1977) bahwa keagalannya biasanya disebabkan oleh faktor beban eksternal yang apabila berinteraksi dengan faktor internal akan mempromosikan kegagalan relak. Retak kecil itu akan menjadi inisiasi retak apabila dikenai beban bolak balik dan kemudian diikuti oleh penjaralan retak sampai putusnya poros dengan cepat, sehingga kerusakan yang *catastrophic* dapat terjadi. Retak paths poros terjadi akibat pembebanan mekanik dan termal yang bersifat siklik itu, biasanya disebut kegagalan poros akibat *fatigue*.

Menurut Bennatine, et. al. (1990) bahwa antara 60-95% kegagalan elemen mesin dan struktur adalah akibat fatik.

ASME (1975) telah merepresentasikan tanda patah fatik dari komponen silindik mulus dan bertakik di bawah pelbagai kondisi pembebanan tarik-tarik atau tank-kompresi, lentur satu-arah, lentur bolak-balik, torsi dan rotasi lentur. Beban rotasi lentur itu sering ditemukan kegagalan pada sistem pular dari suatu mesin.

Pada dasarnya, menurut Wulpi (1990) dan Rolfe dan Balsom (1988), komponen struktur atau elemen mesin dapat rusak prematur dengan berbagai alasan sebagai berikut

1. Material diluar spesifikasi fungsionalnya. Kategori ini meliputi komposisi kimia (paduan), aspek struktur mikro, dan sifat mekanik.
2. Dimensi produk dan toleransi ukuran. Aspek ini menyatakan tentang proses permesinan, meliputi berapa baik dan tepat suatu produk antara poros dengan bantalan; apabila tidak tepat akan menjadi penyebab komponen tersebut rusak.
3. Mode beban dan tegangan, baik besaran maupun arah didalam sistem. Hal ini tidak mencakup kemungkinan overload, patah fatik, patch getas, dll.
4. Aspek lingkungan yang dapat menyebabkan logam gagal. Hal terakhir ini meliputi overheat, korosi, dal.

Setiap aspek di atas akan memiliki kontribusi individu ataupun kombinasi, baik secara langsung ataupun tak langsung, terhadap kegagalan material.

METODE PENELITIAN

Alat Penelitian

1. Atomic Spectrometry
2. Kamera Optik
3. Mesin gergaji
4. Mesin Milling
5. Metalografi
6. Mesin Uji Tarik
7. Mesin Uji Inpak Charily

Bahan Penelitian

1. Poros patah: jenis bahan dan komposisi kimia belum diketahui.
2. Marble's Reagent per ASTM E407: 3 g H₂SO₄; 20 ml HCl; dan 20 ml H₂O.

Cara Penelitian

1. Informasi yang dapat diperoleh dari lapangan.
2. Observasi visual pada spesimen (poros rusak).
3. Pengujian struktur makro dan struktur mikro.
4. Pengujian mekanik (uji kekerasan dan pukul-takik *charpy*)
5. Analisis komposisi kimia material.

Metode Analisis

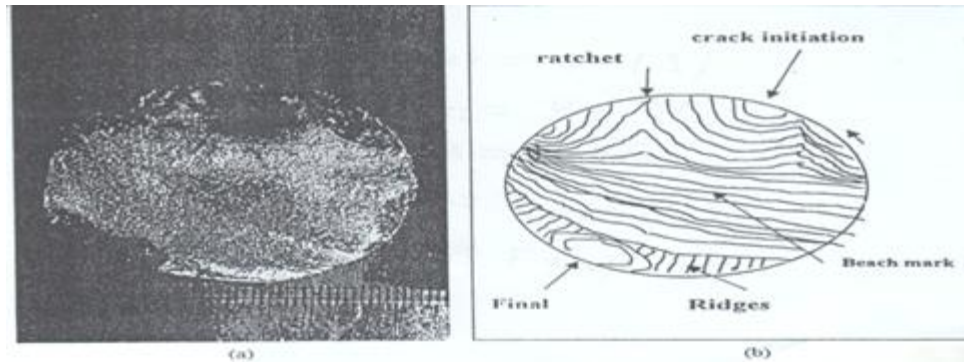
Untuk melakukan observasi visual pada permukaan spesimen, permukaan patahan dan struktur mikro material digunakan kamera optik. Untuk mengetahui sifat-sifat mekanik poros digunakan mesin uji kekerasan dan mesin uji pukul-takik.

Dengan menggunakan *atomic mass spectrometry*, komposisi kimia dianalisis untuk mengetahui sistem paduan material poros. Berdasarkan pembebanan dan tegangan yang ekstensif akan didasarkan cara penelitian di atas, maka ditetapkan metode analisis deskriptif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemeriksaan Visual

Poros pompa yang telah rusak dapat dilihat sebagaimana Gambar 1. Penilaian visual terhadap gambaran fisik yang penting, sebagai berikut: poros yang patah disekitar bantalan, permukaan poros mengandung beberapa daerah yang mengalami keausan dan cacat yang ditunjukkan oleh goresan-goresan yang tegak lurus sumbu poros. Beberapa daerah juga tampak berwarna coklat yang menunjukkan adanya aktivitas korosi, tetapi tidak kritis, karena serangan korosi ini akibat terbuka kena udara basah atau *electrolytic*.



Gambar 1. Permukaan patah dari poros gagal Aktual, dan (b) skematik

Pemeriksaan Fraktografi

Dari hasil observasi, tiga jenis zona kegagalan dapat secara langsung diidentifikasi, yaitu: (i) daerah inisiasi retak, (ii) daerah penalaran retak, dan (iii) daerah putus akhir. Berdasarkan kriteria energi patah, permukaan patah dan cacat yang ditunjukkan oleh goresan-goresan yang tegak lurus sumbu poros. Beberapa daerah juga tampak berwarna coklat yang menunjukkan adanya aktivitas korosi, tetapi tidak kritis, karena serangan korosi ini

akibat terbuka kena udara basah atau *electrolytic*.

Permukaan patah terdiri dari tiga bagian. Bagian pertama, tampak daerah inisiasi retak pada permukaan poros (Gambar 1). Kemudian, akibat pengaruh beban luar, retak menjaral membentuk tanda pantai yang makin ke arah kanan makin lebar. Arah penalaran retak dan cekungan menunjukkan asal retak. Bagian ketiga, permukaan patahan di sisi kiri bawah dari tanda pantai. Patahan ini berwarna kuning

kemerahan membentuk garis *ridges pattern*, sampai menunjukkan ciri patah akhir.

Permukaan patah secara keseluruhan juga menyatakan bahwa poros pompa itu didahului cacat permukaan (takikan) dan kemudian akibat dikenai beban rotasi lentur dengan tegangan nominal rendah yang berotasi melawan arah jarum jam. Terdiri dari dua bagian utama, yaitu jenis daerah patah fatik (energi fluktuatif) dan daerah patah getas (energi rendah). Patah fatik terdiri dari suatu daerah inisiasi retak pada permukaan poros (tanda panah pada Gambar 1). Kemudian, di bawah pengaruh beban luar, retak menjalar membentuk tanda pantai (*beach mark*), yang makin ke arah kanan makin lebar tanda pantainya.

Berdasarkan daerah penjaralan retak ditunjukkan oleh tiga sumber tanda pantai, tetapi sebuah sumber tanda pantai terbesar, dimana di antara dua *beach mark* tersimpul membentuk sebuah *ratchet mark* yang pada arah cekungnya itu menunjukkan tiga daerah asal (*origin*), dan daerah *origin* terbesar berada di antara dua *origin* yang lain. Tanda unik ini merupakan suatu petunjuk kuat dari jenis atau mode patah fatik. Hal itu, biasanya, berkaitan erat dengan nilai kekerasan rendah (ulet) dari sifat-sifat mekanik material.

Permukaan patah getas berada di sisi kiri bawah dari daerah tanda pantai (*beach mark*), pada dasarnya, terdiri dari dua bagian permukaan patahan yang berbeda. Permukaan patah getas berwarna putih keperakan merupakan arah garis yang tegak lunis tanda pantai yang disebut *ridges pattern*, tetapi di daerah berwarna coklat keabu-abuan di sisi kanan dan sisi kiri dari patah getas ini masih menunjukkan ciri patah akhir. Bagian getas ini terjadi akibat deformasi plastik yang relatif rendah, dibandingkan dengan jenis patah fatik. Dibawah pembesaran yang tinggi, sampai 5000 X (yaitu menggunakan SEM), permukaan patah kemungkinan besar memperlihatkan suatu patah *lintas-butir*.

Beberapa daerah patah getas menunjukkan deformasi geser rendah, mungkin karena terjadi hubungan gesek yang berulang, selama beroperasi, dari dua bidang kontak terbuka antara permukaan poros dan permukaan bagian dalam

bantalan. Pada permukaan patch, yang berlawanan dengan bagian inisiasi (pada Gambar 1) adalah patah akhir.

Pemeriksaan Metalografi

Pengujian baku metalografi dilakukan, berdasarkan prosedur Vander Voorf (1982), mulai dari pemotongan spesimen, pengerindaan dan pemolesan, dan pengetsaan pada permukaannya dengan menggunakan *marble's reagent* untuk menampakkan struktur mikro di bawah mikroskop optik. Pemeriksaan metalograf yang diperoleh (pada pembesaran 100 X dan 200 X) diintegrasikan dalam Gambar 2, menghasilkan fakta sebagai berikut:

1. Bagian tengah material mempunyai suatu struktur mikro khas baja tahan karat austenit coran. Kelas baja tahan karat ini dicirikan dengan struktur fasa dendrit austenit dimana tangan dendrit mengarah ke pusat poros. Dendrit ditunjukkan oleh feature seperti daun cemara, sementara austenit diperlihatkan oleh fasa-fasa lebih terang. Ukuran butiran sekitar 4-5 μ m menyatakan bahwa proses pembekuan dengan laju pendinginan normal dari temperatur fasa austenitnya.
2. Bagian luar (sampai kedalaman kira-kira 4 mm) material mempunyai struktur mikro dengan berbagai bidang slip ke segala arah (dan meliputi twin) yang menyatakan bahwa poros itu telah mengalami proses pengerjaan dingin.
3. Bagian terluar (dari kulit sampai kedalaman kira-kira 1 mm) juga mempunyai struktur mikro dendrit dengan bidang slip ke segala arah, bahkan tampak kristal yang merupakan *twin*, yang menyatakan bahwa poros ini telah mengalami deformasi mekanis. Lapisan-lapisan berikutnya, pada arah kedalaman (dari 1 mm ke 4 mm), terdiri dari kombinasi struktur dendrit austenit, twin, dan bidang slip dengan beberapa inklusi di dalam matrik. Ukuran butiran pada

lapisan kulit ini relatif sama dengan bagian tengah poros. Untuk lebih jelasnya, perbedaan antar lapisan kedahunan dapat diintegrasikan pada Gambar 2.

Pengujian Sifat-sifat Mekanik

Pengujian mekanik terdiri dari dua macam, yaitu (1) uji kekerasan, dan (2) uji pukul-takik (*charpy impact test*). Nilai kekerasan (dalam H_B atau R_C) dapat dipakai untuk mengestimasi kekuatan material (meliputi σ_{uts}) seperti tahanan material terhadap deformasi plastik, dan energi *impact* (suatu pengukuran kualitatif dari tahanan material terhadap patah getas) dapat digunakan untuk mengestimasi ketangguhan material. Pengujian kekerasan mikro dengan menggunakan skala Vicker, HV 100 gf/mm², dari permukaan sampai kedalaman 5 mm. Hasilnya tampak bahwa tingkat kekerasan menurun pada kedalaman

makin jauh dari permukaan ke *inner part*, akibat poros telah mengalami proses pengerasan permukaan tertentu. Kondisi itu merupakan prosedur biasa dalam meningkatkan tahanan fatik dan keausan pada material. Tingkat kekerasan berpengaruh pada aspek desain dan kondisi operasionalnya yang akan dibahas lebih lanjut nanti. Uji pukul-takik yang dilakukan dengan memakai FRANK 30 Kpm pada temperatur kamar ($T=26^0$). Hasil uji pukul-takik charpy ini diplot ke Gambar 2.

Komposisi material dan Sifat Mekanik Lainnya

Analisis kimia dilakukan pada bagian poros, yang diambil dari bagian tengah poros, memakai spektrometer massa atom bertujuan untuk menguji aspek metalurgi. Analisis komposisi kimia yang diperoleh sebagaimana diturunkan dalam Tabel 1.

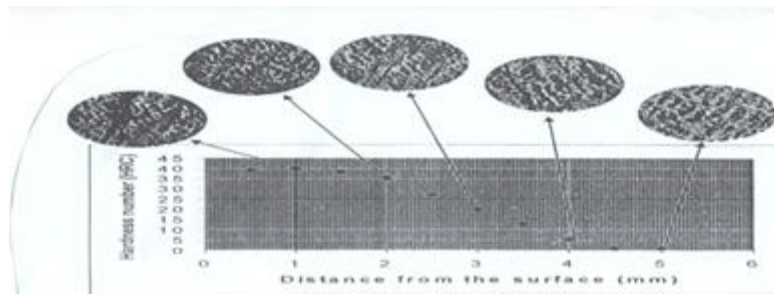
Tabel 1. Komposisi Kimia Aktual Dari Material poros

Unsur	C	Si	Mn	S	Cu	Ni
Kandungan (% Berat)	.051	.316	1.70	.006	.538	8.71
Unsur	Cr	Ti	Al	W	Zr	Fe
Kandungan (% Berat)	19.1	.006	.007	.004	.059	Balans

Menurut komposisi kimia di atas, material poros ini dapat diklasifikasikan sebagai AISI 304 berdasarkan standar ASTM (USA), atau SUS 27 dalam standar JIS (Jepang) dan bukan kelas yang lain karena tidak mengandung unsur paduan lainnya. AISI 304 merupakan baja tahan karat austenitik yang digunakan sebagai batang, poros, dan elemen mesin atau struktur lainnya yang dikenai beban torsi, rotasi, dan lentur.

Jika mengkaji lebih lanjut daftar pada tabel I di atas, ternyata komposisi material sesuai dengan spesifikasi ASTM untuk tujuan desain poros. Dan berdasarkan hasil

uji kekerasan dan perubahan struktur mikro terhadap ketebalan penampang poros dapat digambarkan secara simulasi seperti Gambar 2. Profil kekerasan material dan struktur mikro sebagai fungsi jarak dari permukaan poros rusak. Diameter poros sekitar 44,3 mm, dan permukaan dikeraskan dengan kedalaman hanya 4 mm, dan dengan demikian sisa material (sekitar 40,3 mm dari diameter) memiliki tingkat kekerasan sebesar 1,0 HRC (160 HVN atau 160 BHN). Hal ini adalah khas struktur dendrit austenit (secara metalografis) yang didapat dan proses pengecoran.



Gambar 2. Profil kekerasan material dan struktur mikro sebagai fungsi jarak dari permukaan poros rusak

Kemudian, berdasarkan tingkat kekerasan pada permukaan 39 HRC (384 VHN atau 372 BHN), dan secara metalografis pada permukaan (kulit) poros juga tampak begitu banyak bidang slip dengan arah yang acak menyatakan khas fasa dendrit austenit yang biasanya dihasilkan dari pengerasan permukaan secara *shot reening* terhadap material. Alasannya, apabila bahan poros itu telah mengalami proses *surface rolling*, *surface forging*, atau *case hardening* biasanya akan merubah struktur mikro sampai merambah bagian tengah poros. Apalagi proses *cave hardening* yang tidak lazim dilakukan untuk material AISI 304 ini.

Karena itu, jelaslah bahwa material ini sangat alet (karena itu sangat tangguh) pada bagian tengah atau sekitar 80% dari luas permukaan patahan, sisanya sangat keras dan getas pada permukaan. Dengan mudah dapat diperkitakan bahwa baja tahan-karat austenitik AISI 304, itu memiliki kekuatan tarik *ultimate* sekitar $\sigma_{UTS} = 541 \text{ MNm}^{-2}$ (78,5 ksi, atau 55,26 kgf/mm).

Pada profil di atas, terlihat bahwa sifat-sifat mekanik, di bagian dalam (tengah) batang poros baja tahan karat austenitik tidak-berada dalam rentang spesifikasi. Nilai kekerasan yang tinggi, pada permukaan material tampaknya lebih sesuai, digunakan untuk poros, poros-engkol, roda gigi, kawat baja, dan lain-lain karena harus memiliki kekerasan yang sangat tinggi. Jadi, berdasarkan analisis material ini dapat disimpulkan bahwa material tidak sesuai dengan spesifikasi, terutama beberapa sifat-sifat mekaniknya; sedangkan sistem paduan (untuk AISI 304) sesuai dengan spesifikasi. Namun demikian, jika poros pompa ini

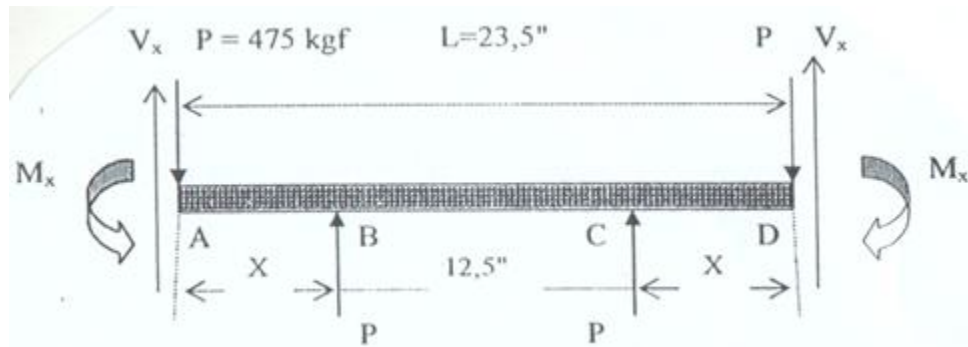
menggunakan bahan yang lebih baik (seperti AISI 316 yang mengandung Molybdenum), niscaya akan sangat sesuai untuk lingkungan korosif itu.

Moda Patahan

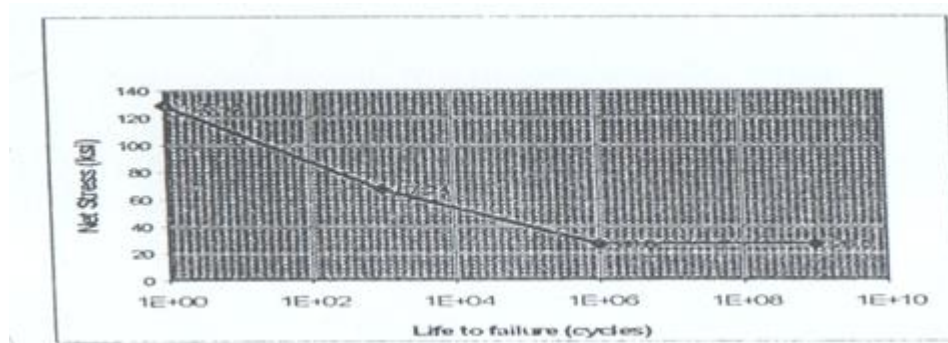
Dengan menganalisis permukaan patah, maka dapat ditentukan bahwa patah poros disebabkan oleh suatu patah lelah jenis beban rotasi lentur dengan tegangan nominal rendah. Hal itu terjadi karena berbagai alasan, beban luar terkonsentrasikan pada titik-titik tertentu yang berupa cacat pada permukaan poros sehingga menghadirkan tegangan tarik lokal yang sangat tinggi. Hal ini dapat ditunjukkan (lihat Gambar 1) bahwa dari tiga titik inisiasi retak, hanya satu titik di antara dua titik lainnya adalah inisiasi retak terbesar, yang kemudian benjalar hingga patah.

Inisiasi, Penjalaran Retak dan Patah Akhirnya

Suatu sistem pembebanan yang menghasilkan tegangan lokal yang besarnya melebihi titik luluh material, atau bahkan kekuatan tariknya membuat retak mikro mulai membentuk inisiasi. Sebagai bahan coran (lihat hasil metalografis), poros ini patut diduga menyimpan cacat mikro di bawah permukaan, konon ditambah lagi dengan cacat mikro akibat salah-suai dan/atau *misalignment* antara poros dan bantalan. Sekali retak mikro tumbuh, terus berkembang bersania dengan retak mikro yang lain akan inenjadi retak makro, dan menjalar sepanjang jalur atau bagian yang memungkinkan, terutama di bagian luar/permukaan material yang sangat getas.



Gambar 3. Diagram gaya pada mekanis me poros pompa sentrifugal



Gambar 4. Kurva S-N untuk poros

Sesuai hipotesis bahwa penjalaran retak sekeliling poros dimulai dari arah atas, kemudian ke kiri, terus ke kanan dengan *beach mark* yang lebih lebar, dan terbentuk *ridges pattern* di arah kiri bawah, sampian poros mengalami patah akhir. Hal ini akibat retak mencari daerah penjalaran dengan kebutuhan energi yang paling rendah; lagi pula nilai kekerasan yang sangat tinggi pada permukaan. Material yang keras akan sangat rentan terhadap patah getas akibat takikan di ujung retak, khususnya pada pembebanan luar yang sangat tinggi. Pada bagian dalam poros yang ulet tumbuh retak tipikal fatik akibat beban lentur. Ketika tegangan meningkat, selama operasi, retak mulai masuk ke bagian dalam material, dimulai arah tegak lurus dan terdekat dengan lokasi inisiasi.

Analisis Beban

Jumlah beban fluida yang diangkat dari tekanan rendah ke tekanan yang lebih tinggi berat air, berat sudu-impeler, dan gaya yang melawan pemompaan dengan *head total*

123 ft (37,5 m) diasumsikan sebesar 475 kgf. Dari diagram benda bebas seperti pada Gambar 3, momen yang bekerja pada poros adalah momen lentur sebesar 66357,5 kgf.mm. Beban ini yang didukung oleh bantalan dekat volut, sedangkan bantalan di ujung yang lain menderita beban kopling dan akibat puntiran dari elektromotor induksi sebagai penggerak mula.

Analisis Tegangan

Analisis tegangan akan dievaluasi berdasarkan pada kondisi normal dan kondisi abnormal. Pada kondisi susunan normal yang memperlihatkan kesetimbangan pada poros antara bantalan dan beban rotasinya. Dalam kondisi ini, beban terdistribusi merata sepanjang bidang / permukaan kontak; akibatnya tekanan permukaan dan momen lentur yang bekerja pada poros akan sangat kecil.

Kondisi kritis selama operasi, terjadi beban (juga tegangan tarik) maksimum. Selanjutnya, tekanan kerja ; permukaan pada permukaan poros juga akan tinggi

karena kontak permukaan lokal sangat sempit antara poros dan bantalan. Lenturan maksimum terjadi apabila sumbu poros yang tidak berada pada posisi yang normal dengan sumbu bantalan (*misalignment*), umpamanya disebabkan kelebihan suaian (*excessive clearance*) antara poros dan bantalan. Analisis pembebanan dan tegangan pada poros pompa terlebih dahulu menghitung gaya dan momen yang bekerja seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Dengan mengabaikan berat poros, maka momen lentur maksimum (M_b) dapat dihitung pada poros bulat dengan kelengkungan bahu dalam lenturan, sebesar 66357,50 kg-mm. Kemudian, melalui sejumlah manipulasi matematika, maka kurva S-N dapat dikonstruksikan dengan hasil perhitungan tegangan "*net or gross section*" (S_{net}) pada komponen poros, diperoleh sebesar 0,31 kgf/mm² atau 0,44 ksi. Apabila harga S_{net} diplot ke dalam Gambar 4. Kurva S-N, diperoleh umur poros tanpa-lakikan, $N_f \gg 10^6$ cycles (sangat aman untuk umur tak-terbatas).

Setelah menghitung dengan memasukkan dimensi geometri retak, dan membandingkan σ_{max} dengan sifat mekanik pada permukaan poros ($\sigma_{UTS} = 541$ MPa dan $\sigma_{YS} = 247$ MPa), bahwa estimasi beban sekitar 475 kgf menyebabkan poros mengalami kegagalan fatik dengan beban rotasi lentur. Pembebanan maksimum yang bekerja pada poros pompa tersebut ternyata bahwa sampai di atas 33,33 ksi (= 229,81 MPa) masih di bawah kekuatan tarik material ($\sigma_{UTS} = 541$ MPa), dan sekitar 7 % dibawah tegangan luluh material ($\sigma_{YS} = 247$ MPa). Harga ini pun memperkuat hipotesis bahwa kegagalan fatik ring terjadi pada poros itu. Karena $\sigma_{max} = 33,33$ ksi $\gg S_e/S_f = 26,5$ ksi yang berarti poros tidak aman terhadap beban fatik rotasi lentur.

Serangan korosi yang, dari hasil korosi dan ketangguhan permukaan poros, menunjukkan bahwa air atau elektrolitik telah terjadi penetrasi ke dalam celah (*crevice*) antara permukaan poros dan rumah poros. Serangan tidak *uniform*, di suatu bagian masih tetap mulus tetapi di bagian lain mengandung goresan atau keausan, dimana celah relatif terbuka.

Fenomena ini menunjukkan pelumasan kurang baik. Suatu *clearance* yang besar juga akan dapat dianggap sebagai penyebab penetrasi elektrolitik. Korosi juga dapat dianggap sebagai penyebab tak-langsung pembentukan inisiasi retak dan penjalaran retak, walaupun dalam ukuran mikro, dapat menimbulkan konsentrasi tegangan lokal padanya.

PENUTUP

Simpulan

1. Material, menurut komposisi kinua, struktur mikro dan sifat-sifat mekanik sesuai dengan spesifikasi fungsional poros pompa. Kecuali, struktur mikro menyatikan poros ini dibuat dengan proses pengecoran.
2. Fraktografi tampak garis *beach mark*, *ratchet mark* dan *ridges pattern* sepanjang penampangnya, dan patah Betas (patah tiba-tiba) pada bagian patah akhir material.
3. Poros pompa, suatu *rotating equipment*, mempunyai takikan pada pennukaannya ini mengalami patah fatik akibat beban rotasi lentur (rotating bending load).
4. Berdasarkan kurva S-N tampak bahwa kegagalan patah fatik beban rotasi lentur tidak akan terjadi pada elemen poros tanpa takikan permukaan, dan sebaliknya.
5. Kombinasi cacat, baik akibat toleransi suaian yang salah dan/atau misalignment maupun akibat kelemahan coran itu, tampaknya yang menjadi cacat micro dan apabila dikenai beban momen luar menjadi cacat makro sebagai inisiasi retak dimana terjadi peningkatan tegangan lokal tersebut.
6. Pompa ini beroperasi di lingkungan korosif, maka serangan korosif ikut andil juga bagi kegagalan fatik ini, walaupun kurang signifikans pada bahan poros AISI 304 ini.

Saran

1. Poros AISI 304 sebaiknya dibuat dengan proses *forging* dan dilanjutkan juga dengan proses *case hardening* untuk elemen mesin yang beroperasi di lingkungan korosif; atau gunakanlah material poros yang lebih kuat (seperti AISI 316).
2. Proses *assembling* harus ditangani dengan hati-hati agar tidak mengakibatkan suaian yang salah dan/ atau *misalignment* antara poros dan bantalan. Program perawatan, terutama sistem tribology (gesekan, keausan dan pelumasan) harus diterapkan pada poros pompa dengan sempurna.

DAFTAR PUSTAKA

- ASM Metals, 1992, *Handbook* Vol. 12, *Fractography*, American Society for Metals, Ohio: Metal Park.
- Collins, Jack A., 1993, *Failure of Materials in Mechanical Design*, Second Edition, New York and Singapore: John Wiley & Sons.
- Knipowicz, J., 1994, *Failure Analysis Course*, Lhokseumawe: PT. Arun NGL & Mobil Oil Indonesia.
- Marshall, P., 1984, *Austenitic Stainless Steels*, London and New York: Elsevier Publishers.
- Popov, E. P., 1993, *Mechanics of Materials*, 2nd Edition (SI Version), Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- S. T. Rolfe and J. M. Barsom, 1977, *Fracture and Fatigue Control in Structure: Applications of Fracture Mechanics*, Prentice-Hall Inc, New Jersey: Englewood Cliffs.
- Vander Voort, George F., 1984, *Metallography: Principles and Practice*, McGraw-Hill Book Company, New York and Toronto.
- Wulpi, Donald J., 1990, *Understanding How Components Fail*, 6th Edition, American Society For Metals, Ohio: Metal Park.