

## Kajian Tentang Kemungkinan Penggunaan Keyless Joint Untuk Menghubungkan Poros dan Impeler Pompa Sentrifugal

Indra Nurhadi, Husaini Ardi, Aditianto Ramelan dan Hery Setiawan

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung

Jl. Ganesa 10 Bandung, Indonesia

[nurhadi@bdg.centrin.net.id](mailto:nurhadi@bdg.centrin.net.id)

### Abstrak

Dalam makalah ini dibahas kemungkinan penggunaan keyless joint untuk menghubungkan poros dan impeler pompa sentrifugal sebagai alternatif terhadap sambungan memakai pasak dengan tujuan meningkatkan keandalannya. Dengan sambungan jenis ini konsentrasi tegangan yang terjadi akibat adanya alur pasak dapat dihindakan sehingga kemungkinan kegagalan dapat dikurangi. Sambungan kerut tirus dikonstruksi dengan membuat poros dan lubang yang berpasangan mempunyai ketirusan. Diametrical interference yang diinginkan dapat diperoleh dengan memasukkan poros secara paksa ke dalam lubang sejauh jarak tertentu sebanding dengan ketirusan dan kapasitas torsi yang diinginkan. Dus, pemanasan impeler dan/atau pendinginan poros tidak diperlukan untuk memudahkan pemasangan.

Kasus nyata yang menjadi contoh dalam makalah ini adalah sambungan poros dengan impeler dari suatu pompa catu bahan baku kimia berdaya 280 kW. Media yang korosif disertai konsentrasi tegangan yang tinggi mengakibatkan sambungan tersebut mengalami kegagalan kronis di daerah alur pasak. Sejumlah upaya perbaikan dengan memakai bahan poros yang lebih berkualitas sudah dilakukan, namun kegagalan tetap terjadi. Salah satu upaya untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan mengubah sambungan berpasak menjadi sambungan kerut dengan ketirusan total 1/144 tanpa pasak. Poros dan impeler dibuat dari bahan sesuai dengan spesifikasi aslinya yaitu SS 316.

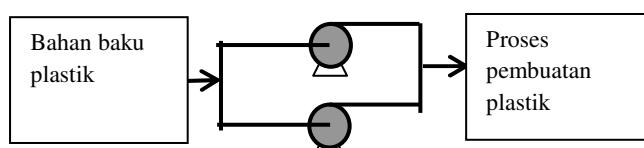
Walaupun sambungan seperti ini berhasil baik untuk kasus roda gigi, uji coba untuk pompa sentrifugal dengan media yang korosif (asam semut) belum menunjukkan tingkat kehandalan seperti yang diharapkan. Sambungan kehilangan kapasitas torsinya setelah dioperasikan selama 1 bulan. Ketika makalah ini ditulis, RCFA (Root Cause Failure Analysis) sedang dilakukan untuk mencari penyebab kegagalan dan solusi yang lebih baik.

Kata kunci: Keyless joint, pompa sentrifugal, sambungan kerut tirus.

### 1. Pendahuluan

Pompa merupakan peralatan penting dalam industri kimia, terutama untuk mengalirkan bahan dari proses satu ke proses berikutnya. Pompa yang menjadi obyek dalam makalah ini adalah pompa bahan baku pada suatu industri kimia seperti terlihat pada Gambar 1. Dalam sistem produksi satu jalur ini terdapat dua buah pompa dimana salah satu dioperasikan 24 jam dan yang lainnya dipakai sebagai cadangan. Dengan susunan seperti ini, apabila pompa utama bermasalah, maka pompa cadangan harus siap mengambil alih sehingga proses produksi tetap dapat berlangsung. Oleh karena itu, kedua pompa harus diperlakukan sedemikian rupa sehingga mempunyai keandalan tinggi. Perbaikan harus dilakukan dalam waktu sesingkat-singkatnya apabila salah satu pompa mengalami kerusakan. Perlu dicatat disini bahwa pabrik ini menghasilkan produk dengan harga milyaran rupiah per hari sehingga resiko yang ditanggung sangat tinggi bila pabrik berhenti berproduksi akibat pompa tidak dapat bekerja.

Pompa digerakkan oleh motor listrik induksi asinkron berdaya 280 kW. Berbagai sensor untuk memantau kondisi kesehatan mesin, antara lain sensor getaran, sensor suhu bantalan dan sensor suhu berlebih dipasang permanen pada setiap pompa dalam rangka menjaga keandalan sistem.

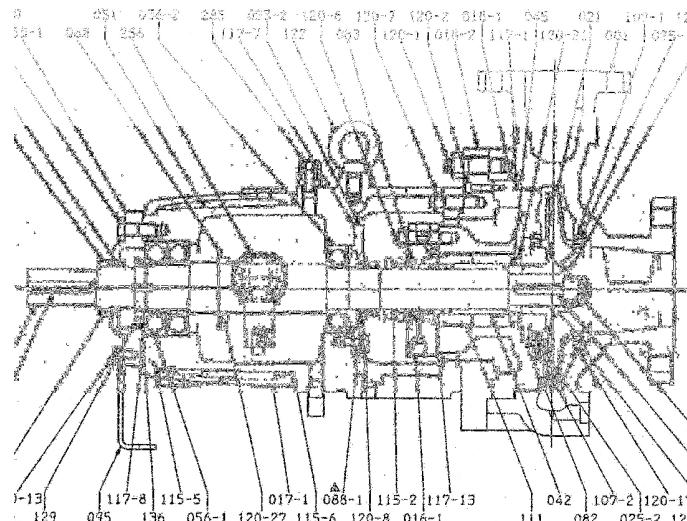


Gambar 1 Pompa catu reaktor kimia (utama dan cadangan)

Menurut rancangan aslinya, poros dengan diameter 65 mm yang terbuat dari bahan SS 316 dihubungkan dengan impeller SS 316 memakai pasak. Kondisi lingkungan yang korosif (asam semut) disertai konsentrasi tegangan yang tinggi mengakibatkan sambungan tersebut mengalami kegagalan *kronis* di daerah alur pasak. Sejumlah upaya perbaikan dengan memakai bahan poros yang lebih kuat seperti superduplex dan hastelloy telah dilakukan, namun kegagalan tetap saja terjadi yang ditengarai dengan MTBF (mean time between failure) dari pompa yang terlalu singkat, yaitu kurang dari 1 tahun.

Sambungan berpasak (*key joint*) sangat umum digunakan untuk mentransmisikan torsi dari poros ke impeler berbagai pompa sentrifugal, seperti terlihat pada Gambar 2. Bila dirancang dengan benar, jenis sambungan ini dapat memberikan tingkat kehandalan yang tinggi. Oleh karena itu perbaikan yang biasanya dilakukan pada pompa hanya menyangkut komponen-komponen seperti *packing*, *seal* dan *bearing*. Kerusakan pada alur pasak sangat jarang dijumpai, namun hal itu mungkin terjadi mengingat adanya titik-titik dengan konsentrasi tegangan tinggi, misalnya pada pojok alur pasak. Terlebih lagi bila sambungan tersebut berinteraksi dengan lingkungan yang korosif seperti yang terjadi pada pompa ini.

Dua dari beberapa jenis kerusakan ditunjukkan pada Gambar 3a dan 3b. Gambar 3a menunjukkan poros Superduplex yang patah total sedang Gambar 3b menunjukkan poros Hastelloy dengan dinding alur pasak yang hancur. Perlu dicatat bahwa material Superduplex dan Hastelloy C 276 mempunyai kekuatan dan ketahanan terhadap asam yang lebih baik dari pada SS316, namun kegagalan masih tetap saja terjadi. Sehubungan dengan masalah ini, analisis kegagalan (failure analysis) diperlukan untuk menentukan solusi yang tepat.



Gambar 2. Sambungan berpasak untuk menghubungkan poros dan impeler pompa sentrifugal.

## 2. Analisis Kegagalan

Analisis kegagalan (root cause failure analysis) perlu dilakukan terhadap suatu mesin atau peralatan yang menunjukkan tingkat kehandalan rendah, dengan tujuan untuk mencegah kerusakan yang sama terjadi lagi.

Untuk kasus pompa ini, analisis kegagalan yang meliputi analisis komposisi kimia, pengujian sifat mekanik, analisis struktur mikro patahan menyimpulkan bahwa kegagalan pada poros dan impeler terjadi karena *stress corrosion cracking*.

Sebetulnya bila suhu operasi pompa adalah 60° C, *stress corrosion cracking* tidak mungkin terjadi. *Stress corrosion cracking* pada material poros baru terjadi pada suhu di atas 60° C. Kenyataannya, *stress corrosion cracking* terjadi seperti yang terbukti pada bekas patahan poros. Anomali ini dapat dijelaskan dengan adanya jejak *crevice corrosion* yang aktif. *Crevice corrosion* terjadi, diawali dengan endapan media korosif pada sudut-sudut alur pasak, yang kemudian menjelma menjadi pitting. Perlu dicatat bahwa *critical crevice temperature* dari material Superduplex adalah

40°C dan dari Hastelloy C-276 adalah 60°C. Dari analisis kegagalan dapat disimpulkan bahwa penyebab kerusakan poros adalah *crevice corrosion* karena suhu operasi pompa diatas suhu kritis *crevice corrosion*.



Gambar 3. Kegagalan poros Superduplex (kiri) dan kegagalan poros Hastelloy C-276 (kanan).

Material yang tepat untuk mengatasi *crevice corrosion* adalah *superaustenitic stainless steel* 654 SMO. Material ini mempunyai suhu kritis *crevice corrosion* 75°C, yang berarti lebih baik dari pada Superduplex atau Hastelloy. Selain itu terjadinya endapan media korosif harus dihindari dengan membuat permukaan elemen sambungan bebas dari sudut tajam dan bekas pemesinan yang kasar.

### 3. Solusi Alternatif

Sesuai dengan hasil analisis kegagalan, salah satu penyebab kerusakan pada alur pasak tersebut adalah *stress corrosion cracking* yang diinisiasi oleh terjadinya *crevice corrosion*. *Crevice corrosion* dapat terjadi pada material Superduplex maupun Hastelloy, dimulai dengan adanya endapan media korosif pada sudut yang tajam, *inclusion*, bekas pemesinan yang kasar dlsb.

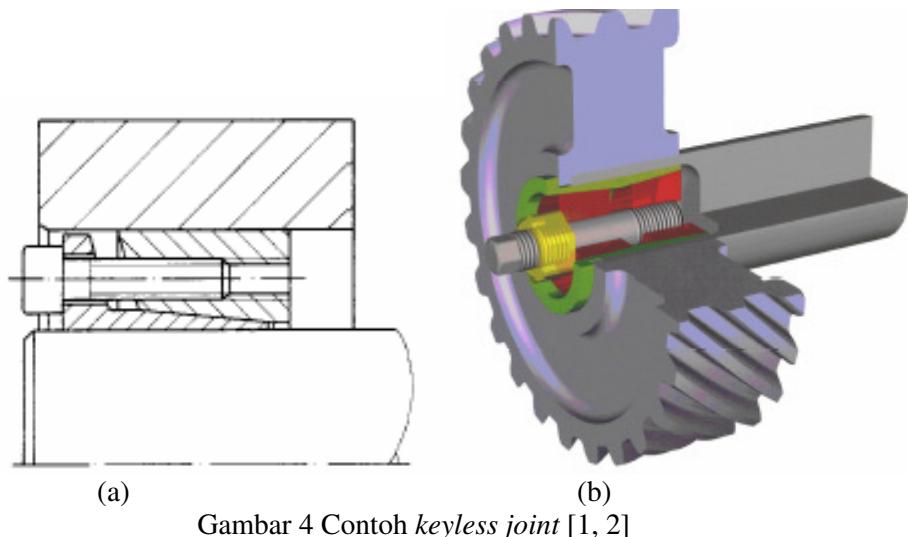
Oleh karena itu diusulkan penggunaan sambungan kerut tirus (*taper shrink fit joint*) untuk kasus ini. Dengan sambungan jenis ini, konsentrasi tegangan yang terjadi akibat adanya alur pasak pada poros dan impeler dapat dihindarkan sehingga kemungkinan terjadinya kegagalan dapat dikurangi. Sambungan kerut tirus dikonstruksi dengan membuat poros dan lubang yang berpasangan mempunyai ketirusan. *Diametrical interference* yang diinginkan dapat diperoleh dengan memasukkan poros secara paksa ke dalam lubang sejauh jarak tertentu sebanding dengan ketirusannya. Dengan demikian, kekuatan sambungan dalam meneruskan torsi juga dapat ditentukan.

Sambungan seperti ini secara telah banyak diterapkan untuk berbagai kebutuhan, baik berupa elemen mesin yang dapat dibeli dipasar atau elemen mesin yang dibuat khusus.

Produk yang dapat dibeli di pasar antara lain dibuat oleh Ringfeder dan Riverhawk seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Produk seperti pada gambar tersebut ditawarkan dalam berbagai rancangan dan ukuran. Dalam hal ini, pemakai biasanya harus menyesuaikan ukuran poros dan roda/impeler dengan ukuran elemen penyambung tersebut. Sambungan seperti ini dapat digunakan untuk mentransmisikan torsi yang cukup besar.

Gambar 4a menunjukkan suatu elemen penyambung poros dengan roda yang berbentuk sepasang cincin dimana permukaan yang bersinggungan dibuat tirus. Kedua cincin dapat dirapatkan dengan mengencangkan baut sehingga terjadi efek *shrink fit*.

Gambar 4b menunjukkan elemen penyambung sejenis, namun dipasang secara internal (di dalam poros). Berbagai elemen penyambung dengan cara kerja yang sama dapat dibeli di pasar.



Gambar 4 Contoh *keyless joint* [1, 2]

Standard yang berkenaan dengan sambungan poros dengan impeler antara lain tertera dalam API 610 dan ASME B 73.1 dan 73.2. Menurut API 610, sambungan poros dengan impeler harus diberi pasak dan diikat memakai mur dengan arah ulir yang mengencang karena gaya tahanan aliran fluida. Menurut ASME sambungan poros dengan impeler harus dipasak atau diberi ulir dengan arah yang mengencang karena putaran. Ulir dan pasak harus dilindungi supaya tidak terkena media yang dipompa.

### Perhitungan Sambungan Kerut Tirus

Perhitungan yang diperlukan dalam merancang sambungan kerut tirus antara lain menyangkut gaya pengencangan baut dan tegangan akibat interferensi lubang-poros.

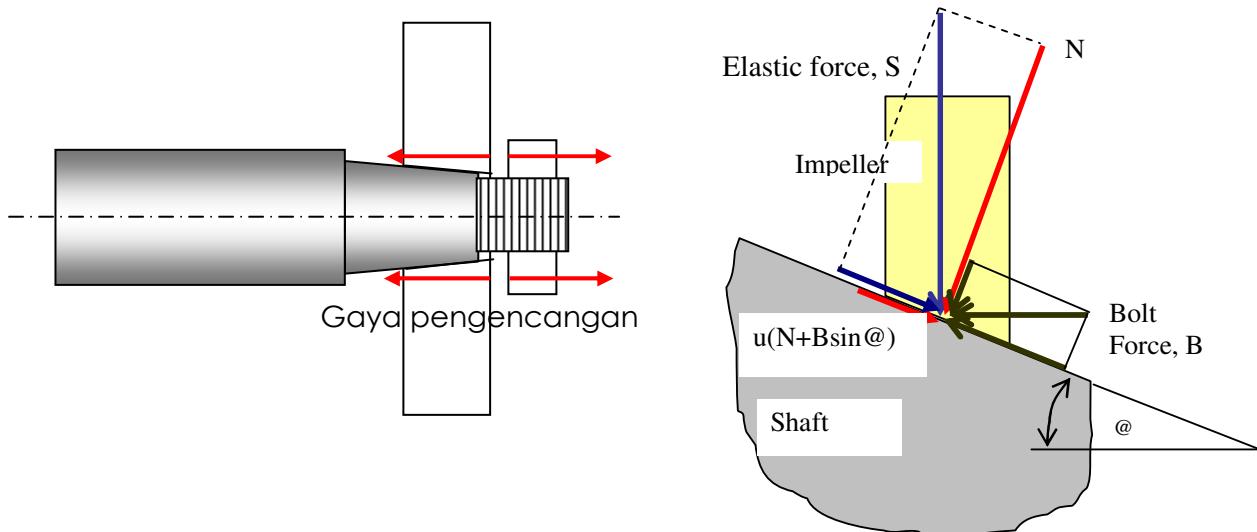
Nilai gaya pengencangan baut dapat dirumuskan dari kesetimbangan gaya-gaya yang dilukiskan pada Gambar 5b.

Bila  $u$  adalah koefisien gesek,  $S$  adalah gaya elastisitas karena pemekaran lubang,  $\alpha$  adalah sudut kemiringan ( $1/2$  dari sudut ketirusan), maka berdasar kesetimbangan gaya-gaya dapat ditulis

$$S \sin \alpha + uN = B \cos \alpha \quad (1)$$

$$S \sin \alpha + u(S \cos \alpha + B \sin \alpha) = B \cos \alpha \quad (2)$$

$$S(\sin \alpha + u \cos \alpha) = B(\cos \alpha - u \sin \alpha) \quad (3)$$



Gambar 5. Skema sambungan poros dengan impeler tanpa pasak (a) dan kesetimbangan gaya-gaya pada bidang kontak poros dan lubang (b).

Gaya pengencangan baut B dapat dirumuskan sebagai

$$B = S(\sin\theta + u\cos\theta)/(\cos\theta - u\sin\theta) \quad (4)$$

Bila sudut kemiringan  $\theta$  cukup kecil, sambungan jenis ini mempunyai kemampuan mengunci sendiri (*self locking*) bila

$$u > \tan\theta \quad (5)$$

sehingga baut pengencang hanya berfungsi sebagai pengaman.

Selanjutnya tegangan akibat interferensi poros-lubang dan *diametrical interference* yang dibutuhkan dapat dihitung berdasar persamaan Lame untuk silinder berdinding tebal berikut.

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} - \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (6)$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} + \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{r^2 (b^2 - a^2)} \quad (7)$$

$$U_r = \frac{r (St - v Sr)}{E} \quad (8)$$

dimana  $\sigma_r$  adalah tegangan radial  $\sigma_t$  adalah tegangan tangensial,  $U_r$  adalah perpindahan radial,  $a$  adalah jari-jari dalam,  $b$  jari-jari luar,  $r$  jari-jari dimana  $\sigma$  dan  $U$  dihitung,  $p_i$  adalah tekanan pada dinding dalam,  $p_o$  tekanan pada dinding luar,  $E$  modulus elastisitas.

Berdasarkan nilai tekanan antara permukaan poros dan permukaan lubang impeler dan dengan harga koefisien gesek yang memadai, *diametrical interference* yang diperlukan untuk mencapai kapasitas torsi yang diperlukan dapat dihitung (Tabel 1). Selanjutnya jarak pergeseran aksial yang diperlukan pada waktu pemasangan poros ke dalam lubang dapat dihitung.

Tabel 1. Data sambungan dan hasil perhitungan

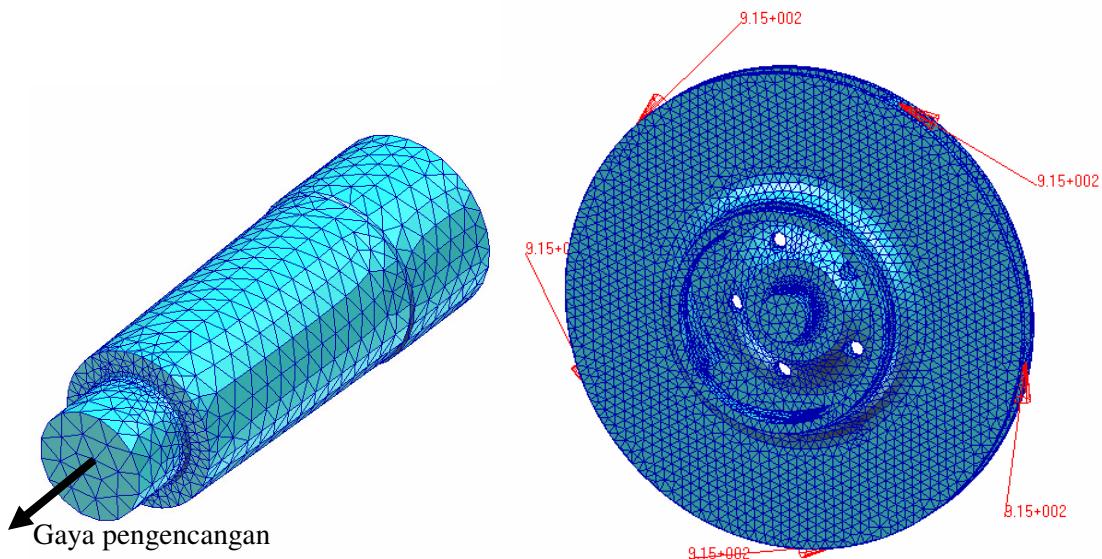
Diameter poros	Maks. kW	Ketirusan	Koef. gesek	Faktor keamanan	Jarak aksial pemasukan poros ke lubang	Diametrical interference
65 mm	280	1/144	0.07	1.5	6 mm	21 mikron

#### 4. Analisis Elemen Hingga.

Walaupun analisis tegangan sudah dilakukan memakai persamaan Lame, analisis elemen hingga masih diperlukan untuk mengetahui secara detil nilai tegangan di titik-titik yang dipandang kritis seperti fillet dan lubang pada poros dan impeler. Selain itu, bentuk impeler yang kompleks menjelaskan perlunya analisis elemen hingga.

Untuk analisis elemen hingga, model poros dan impeler mula-mula dibuat terpisah kemudian digabung dengan cara memodelkan interaksi permukaan poros dan lubang yang bersinggungan memakai elemen gap. Dengan elemen gap dapat diterjemahkan dua permukaan yang saling menekan, ber gesekan dan saling menjauh.

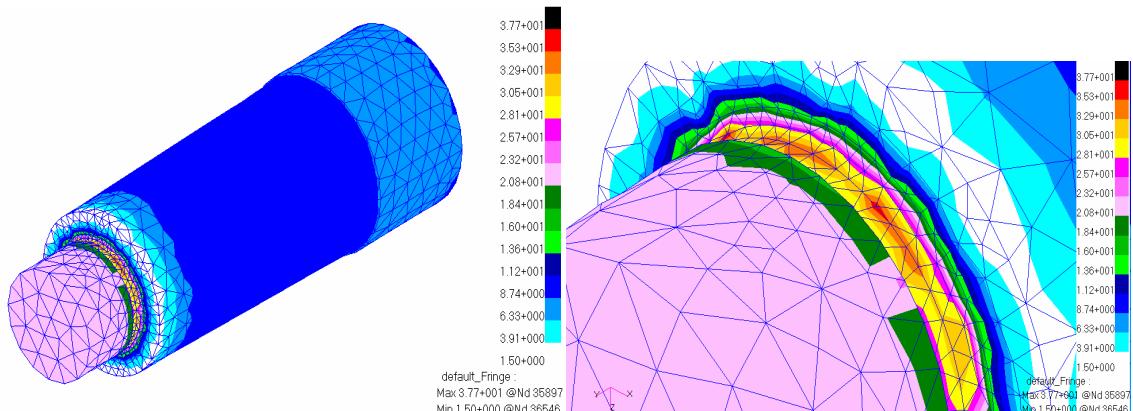
Beban yang dikenakan pada model antara lain gaya pengencangan baut dan torsi pada impeler. Berbagai kombinasi beban lain yang mungkin terjadi juga perlu disimulasikan dalam analisis elemen hingga.



Gambar 6. Pembebaan pada poros dan impeler

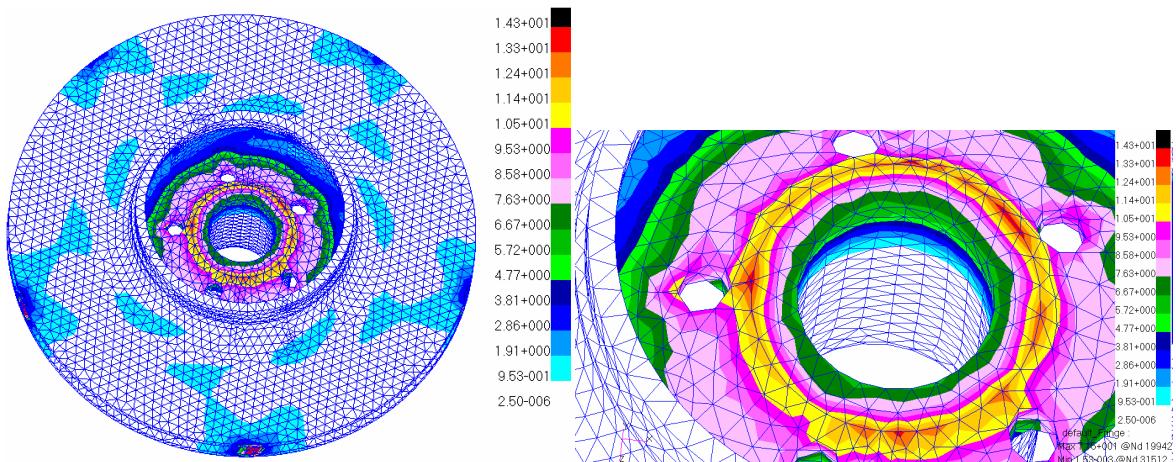
Gambar 7 menunjukkan distribusi tegangan von Mises pada poros. Tegangan maksimum terjadi di daerah fillet yang menghubungkan ujung poros berulir dengan bagian poros yang berkонтак dengan lubang impeler dengan nilai 37.7 MPa, sedang tegangan di daerah yang berkонтак dengan impeler sangat rendah.

Gambar 8 menunjukkan distribusi tegangan von Mises pada impeler. Terlihat tekanan akibat sambungan kerut hanya berpengaruh pada bagian dalam dari impeler, terutama bagian yang berkонтак dengan poros.



Gambar 7. Hasil analisis elemen hingga untuk poros.

Tegangan maksimum pada impeler adalah 14.3 MPa. Dengan anggapan adanya faktor konsentrasi tegangan akibat saluran hidrolik (untuk memfasilitasi pelepasan impeler dari poros) sebesar 4, tegangan maksimum yang terjadi menjadi 57.2 MPa.



Gambar 8. Hasil analisis elemen hingga untuk impeler.

## 5. Pengujian

Sebelum rancangan ini diterapkan pada poros dan impeler pompa, suatu percobaan dilakukan pada poros dan lubang yang sama dengan poros dan lubang impeler tetapi terbuat dari bahan yang lebih murah. Percobaan ini dilakukan untuk mendapatkan pengalaman dan mengetahui lebih awal gaya pengencangan baut sebagai fungsi dari ketirusan dan perpindahan aksial antara poros dan lubang. Tingkat persinggungan yang baik antara permukaan poros dan lubang diuji dengan mengoleskan bahan warna biru (*blue dye*) pada kedua permukaan sebelum dipasangkan. Dengan cara ini dapat diketahui bagian-bagian yang menonjol dari permukaan yang berkontak yang diperlukan dikikis untuk memperoleh persinggungan yang lebih baik.

Berdasarkan pengalaman tersebut konstruksi sambungan pada pompa dikonstruksi setelah poros dan impeler baru dimanufaktur dari material SS316. Setelah semua komponen terpasang pompa langsung dioperasikan.

Walaupun sambungan seperti ini berhasil baik untuk kasus roda gigi, uji coba untuk pompa sentrifugal dengan media yang korosif (asam semut) belum menunjukkan tingkat kehandalan seperti yang diharapkan. Sambungan kehilangan kapasitas torsinya setelah dioperasikan selama 1 bulan. Ketika makalah ini ditulis, RCFA (Root Cause Failure Analysis) sedang dilakukan untuk mencari penyebab kegagalan dan solusi yang lebih baik.

## 6. Penutup

Makalah ini membahas analisis *keyless joint*, suatu sambungan kerut yang diperoleh dengan cara membuat poros dan lubang yang berkontak mempunyai ketirusan. Walaupun *keyless joint* merupakan suatu alternatif terhadap sambungan berpasak yang sudah banyak diterapkan dalam berbagai konstruksi mesin, aplikasi yang terpercaya hanya dapat diperoleh bila lingkungan disekitar sambungan tidak korosif, misalnya oli. Untuk aplikasi pada pompa dengan media korosif seperti yang dibahas dalam makalah ini masih diperlukan kajian lebih lanjut.

## Daftar Pustaka

[www.ringfeder.com](http://www.ringfeder.com), Ringfeder Catalog, RINGFEDER Corporation, 165 Carver Avenue, NJ 07675

[www.riverhawk.com](http://www.riverhawk.com), Internal Expanding Shaft Clamp Catalog.

API 610

ASME B73.1 & ASME B73.2