

# INVESTIGASI FRAKTOGRAFI DAN ANALISA TEGANGAN PADA KERUSAKAN BAUT M64 GRADE 10,9 YANG MENGALAMI PENGENCANGAN BERLEBIH

## *FRACTOGRAPHY INVESTIGATION AND STRESS ANALYSIS ON FAILURE OF BOLT M64 GRADE 10.9 DUE TO OVER TIGHTENING*

Apriardi Ihlas\*, Daniel Fajar Puspita, Budi Tjahjohartoto

Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Jl. Sangkuriang No. 14 Bandung

\*Email: apriardi.ihlas@gmail.com

Diterima: 27 Februari 2018

Direvisi: 15 Maret 2018

Disetujui: 26 Maret 2018

### ABSTRAK

Baut dengan dimensi yang relatif besar umum digunakan pada infrastruktur, misalnya di pelabuhan. Telah dilakukan investigasi kerusakan pada baut M64 Grade 10,9 yang mengalami patah antara bagian kepala dan batang. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui penyebab kerusakan agar kejadian serupa tidak terulang kembali. Oleh karena itu, dilakukan serangkaian pengujian, pemeriksaan, dan perhitungan terhadap tegangan yang bekerja, yaitu (1) pemeriksaan visual dan fraktografi, (2) pengujian komposisi kimia, dan (3) perhitungan analisa tegangan. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa sebagian besar permukaan patah didominasi oleh indikasi daerah beban berlebih (*zona overload*) yang menunjukkan patah getas dan terjadi seketika. Hal ini dibuktikan dengan ditemukan beberapa *ratchet mark* yang merupakan tipikal adanya konsentrasi tegangan. Kondisi ini sangat sensitif terhadap beban tarik pada saat pengencangan. Berdasarkan analisa permukaan patahan termasuk kategori menerima kombinasi beban tarik dan *bending* yang terkonsentrasi. Sedangkan berdasarkan perhitungan analisa tegangan membuktikan bahwa telah terjadi beban torsi berlebih (*over-torquing*) yang diterima oleh baut.

**Kata kunci:** baut, konsentrasi tegangan, fraktografi, *ratchet mark*

### ABSTRACT

*Bolt with relatively big dimension is generally used in infrastructure construction, such as in harbors. An investigation on failure of M64 bolt 10.9 grade had been done. The objective of this research is to analyze the cause of failure to prevent repeated incident. A series of testing including: (1) visual and fractography check, (2) chemical composition test, (3) torsional shear calculation has been conducted to support the investigation. The result showed that the fracture zone is dominated with overload zone, which indicated an instantaneous brittle fracture. This was supported with the findings of several ratchet mark as a symptoms of stress concentrated. The condition was very sensitive to bending load during tightening. Based on fracture surface analysis the fracture belonged to concentrated high bending load. As for the torsional shear calculation, it proved that there was an over-torquing subjected to the bolt.*

**Keywords:** bolt, stress concentration, fractography, *ratchet mark*

### PENDAHULUAN

Perkembangan ekonomi suatu negara ditunjukkan dengan perkembangan infrastruktur. Pekerjaan sipil yang meliputi banyak hal, diantaranya dermaga, membangun pabrik, dan konstruksi anjungan minyak dan gas bumi. Semua pekerjaan tersebut memerlukan proses

penyambungan. Sambungan merupakan bagian yang banyak dijumpai pada setiap konstruksi yang memiliki fungsi untuk mengantar dan meneruskan gaya yang tidak disertai gerak. Selain pengelasan, penggunaan baut dan mur sangat banyak digunakan.

Fungsi baut sebagai alat penyambungan atau pengikat komponen satu dengan lainnya,

agar menjadi satu kesatuan yang kokoh dan terbentuk sesuai dengan keinginan perancangannya. Teknik penyambungan dengan menggunakan baut dan mur relatif lebih aman, karena lebih mudah dipasang dan bongkar kembali apabila diperlukan untuk melakukan perawatan dan perbaikan [1]. Namun penggunaan baut dan mur sebagai sambungan memiliki kekurangan yaitu kemungkinan terjadi pelonggaran ketika sambungan tersebut menerima beban dinamik [2].

Pemilihan baut dan mur sebagai alat pengikat harus dilakukan cermat dan seksama sesuai dengan besarnya dan jenis beban yang diterima. Ketika diaplikasikan, baut menerima beban. Beban yang diterima bisa bermacam-macam, baik beban dinamik maupun beban statik. Beban dinamik, misalnya beban lelah. Beban statik, dapat berupa beban tarik, beban tekan, dan beban puntir. Selain itu, beban yang diterima puntir dapat beban rendah maupun beban tinggi atau berlebih [3].

Kegagalan pada sambungan baut dan mur bisa disebabkan oleh dua hal, yaitu karena kegagalan statis dan kegagalan dinamis. Kegagalan statis terjadi karena beban berlebih (*over loading*), pengencangan yang terlalu kuat saat pemasangan (*over tightening*), atau karena produk yang dipakai tidak memenuhi standar. Sedangkan kegagalan dinamis bersifat lebih kompleks, yang berkaitan dengan kelelahan bahan (*fatigue*) yang terakumulasi selama siklus hidup pemakaian. Hal ini bisa disebabkan karena kurang kencangnya baut-mur, pelonggaran semasa pemakaian (*self loosening*). Retakan akan terbentuk dan berkembang karena beban dari luar dan beban siklus (*external and cyclic load*).

Para peneliti dan praktisi telah melakukan beberapa analisa mengenai kegagalan sambungan baut-mur untuk berbagai aplikasi. Dari beberapa contoh yang ada, sebagian besar studi berpusat pada kegagalan pada baut yang termasuk pada kategori patah lelah [4,5].

Pada penelitian ini, kegagalan pada baut diperkirakan terjadi karena kegagalan statis. Dugaan ini diperkuat karena baut mengalami patah sehari setelah pemasangan. Baut yang akan menjadi objek pada penelitian ini adalah baut jenis M64 grade 10,9 yang dipasang pada konstruksi pembangunan jembatan dan mengalami patah. Baut yang patah kemudian dianalisa untuk mengetahui penyebabnya.

Proses rusaknya baut dijelaskan pada kronologi berikut ini. Baut awalnya dipasang pada struktur dan dikencangkan dengan *final pressure* 7400 psi/torsi 7337 Nm (100%). Proses pengencangan (*torquing*) dilakukan secara bertahap (40%, 80%, dan 100%) dan kemudian baut dilepas. Baut tersebut dipasang ulang pada struktur dan dikencangkan dengan *final pressure* 6800 psi/torsi 12354 Nm (100%). Pengencangan (*torquing*) juga dilakukan secara bertahap yaitu 40%, 80%, dan 100%. Penambahan *torquing* dilakukan sampai mencapai *pressure* 10000 psi/torsi 18165 Nm. Kurang lebih 1 hari kemudian baut patah tepat di antara bagian batang dan kepala.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mencari penyebab patahnya baut M64 grade 10.9 tersebut. Dengan mengkaji akar permasalahan, maka akan diketahui beban pengencangan yang sesuai dan akhirnya dapat mencegah terulang kembali kerusakan/kegagalan yang sama pada jenis baut tersebut.

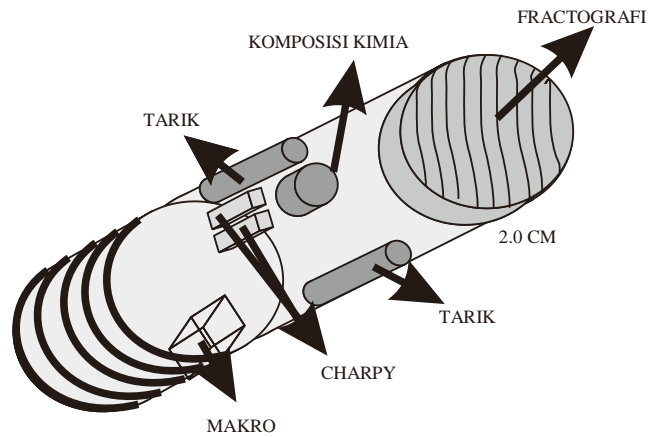
## BAHAN DAN METODE

Bahan penelitian yang akan diperiksa adalah baut dengan material baja 40Cr dan komponen M64 Grade 10,9 yang mengalami kerusakan.

Serangkaian pemeriksaan dan pengujian dilakukan untuk mengetahui penyebab kerusakan baut. Pengujian laboratorium yang dilakukan meliputi hal-hal berikut ini.

- Pemeriksaan visual untuk melihat lokasi patahan dan memberi gambaran awal investigasi.
- Pemeriksaan fraktografi makro, yaitu mengambil foto pada pembesaran rendah. Pemeriksaan fraktografi untuk mengidentifikasi jenis patahan yang terjadi.
- Pemeriksaan metalografi, baik makro maupun mikro.
- Analisa tegangan untuk menentukan tegangan yang diterima oleh baut dan mengetahui sejauh mana efek konsentrasi tegangan terhadap pengencangan/*torquing*.

Serangkaian pemeriksaan dan pengujian akan dilakukan setelah dilakukan penentuan lokasi uji, khususnya untuk pengujian. Beberapa jenis pengujian dilakukan hanya untuk verifikasi material. Lokasi pengambilan spesimen uji lebih lengkap dapat dilihat pada Gambar 1.



Baut M.64 Grade 10,9

**Gambar 1.** Lokasi Pengambilan Sampel Pengujian dan Pemeriksaan

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pemeriksaan Visual

Pengamatan menyeluruh pada baut yang rusak memperlihatkan kerusakan berupa patah tepat di takikan antara kepala dan batang (Gambar 2). Deformasi plastis sangat kecil memberi indikasi terjadinya patahan getas. Patah getas sangat sensitif terhadap konsentrasi tegangan. Desain atau dimensi, khususnya radius lekukan antara kepala baut terhadap batangnya

sangat berpengaruh terhadap ketahanan beban yang diberikan. Pengencangan yang melebihi kekuatan luluh material akan berakibat fatal [6].

Identitas baut mengacu ke sistem metrik/ISO yaitu M64. Grade 10,9 yang berarti memiliki diagonal utama 64 mm dan jarak antar *pitch* 10,9 mm [7]. Dimensi baut relatif besar yang umumnya digunakan pada infrastruktur sipil.



**Gambar 2.** Baut M64 Grade 10,9 yang Mengalami Kerusakan

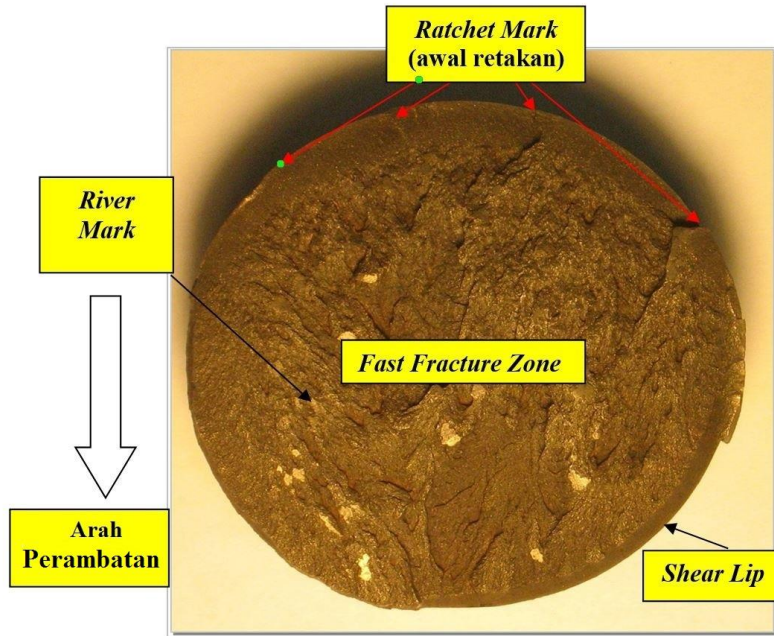
### Pemeriksaan Fraktografi Makro

Pemeriksaan permukaan patahan secara visual dapat mengidentifikasi lokasi awal retakan, arah pergerakan retak, dan mekanisme kegagalan. Bidang patahan yang terjadi relatif tegak lurus terhadap arah memanjang batang baut. Patahan bagian batang sedikit cembung dan sebaliknya pada bagian kepala terlihat sedikit

cekung (Gambar 3 dan Gambar 7). Hampir seluruh permukaan didominasi oleh daerah *fast fracture zone* (FFZ) yang memberi indikasi patahan getas yang terjadi seketika. Hal ini sesuai dengan informasi yang diberikan bahwa kerusakan yang terjadi hanya berselang sehari setelah pemasangan.

Daerah FTZ atau zona *overload* mendominasi permukaan patahan, yaitu lebih dari 80%. Kondisi permukaan sangat kasar. Variasi kekasaran yang cukup ekstrim memberi indikasi beban yang diterima tidak hanya tarik, namun juga *bending* [8]. Zona ini berlangsung sangat cepat dan tidak stabil. Pada zona ini, *river mark* tidak terlihat sempurna arahnya sehingga titik mudah menentukan lokasi awal retakan.

Keberadaan beberapa *ratchet mark* merupakan petunjuk bahwa patahan karena *high stress concentration* dan *multiple* retakan awal [9]. Tanda ini memberi batas yang memisahkan antara dua bidang patahan awal. Sedangkan retak awal berada di antara *ratchet mark*. Jadi, tanda ini akan memberi petunjuk arah pergerakan retakan. Akhir dari pergerakan retakan adalah daerah *shear lip*.

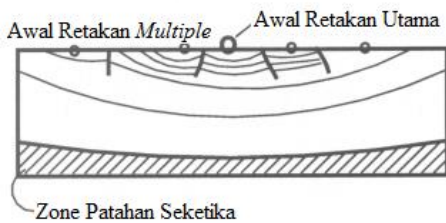


**Gambar 3.** Permukaan Patahan pada Batang Baut yang Rusak

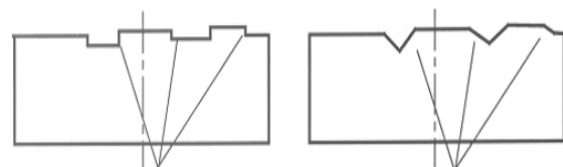
Selain itu, visual tampak samping *ratchet mark* seperti yang diperlihatkan Gambar 5 dapat menentukan jenis beban yang diterima. Beban yang diterima oleh baut adalah beban tarik/*bending*. Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya pada kondisi permukaan FTZ.



**Gambar 5.** Tampak Samping *Ratchet Marks*



**Gambar 4.** Skema *Multiple Origin* sebagai Awal Retakan [10]



Tampak Samping *Ratchet Marks* yang disebabkan oleh Tarikan dan Lengkungan

Tampak Samping *Ratchet Marks* dengan Gaya Utama adalah Torsi

**Gambar 6.** Sketsa Bentuk *Ratchet Mark* [10]

Keberadaan *shear lips* pada sebagian sisi luar lingkaran dengan kedalaman yang relatif dangkal yaitu sekitar 5 mm. Tipikal tanda ini secara visual makro pada permukaan patahan memberi indikasi bahwa inisial retakan merupakan campuran getas dan ulet [10]. Ukuran *shear lip* sangat tergantung pada diameter baut dan sifat mekanik logam. Pada kasus ini, ukuran yang relatif kecil menunjukkan bahwa logam ini relatif getas. Jadi, *shear lips* yang kedua merupakan tahap akhir retakan. Sebaliknya daerah pertama merupakan awal retakan.

Keberadaan *shear lips* memberi petunjuk ketangguhan dan model kegagalan suatu material. Bagian ini merupakan bagian tahap akhir suatu patahan yang menunjukkan terjadinya beban tarik dan *bending* berlebih yang diterima oleh baut. Lebar *shear lips* tergantung pada diameter baut, retakan awal, dan nilai  $K_{IC}$  material [11]. Baut yang lebih kuat cenderung memiliki ukuran tebal *shear lips* yang semakin tipis [12]. Zona *shear lip* adalah zona penutup/akhir dari proses perambatan retak. Diduga sedikit pengaruh beban *rotation bending* yang menyebabkan condong ke kanan sesuai skema permukaan patahan.

### Pemeriksaan Metalografi Makro



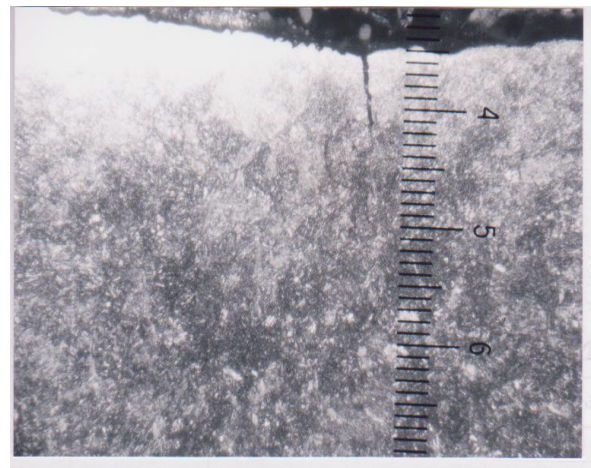
Gambar 7. Foto Makro pada Bagian Kepala Baut

Pengujian makroskopis dilakukan pada penampang bagian kepala yang patah. Foto makro memperlihatkan *flowline* yang membuktikan bahwa bagian ini telah mengalami *upset forging* dalam proses pembuatannya [13]. Selain itu, Gambar 7 mempertegas penjelasan pemeriksaan visual sebelumnya bahwa permukaan patahan pada kepala baut cenderung cekung. Hal ini merupakan indikasi faktor konsentrasi tegangan tinggi [14].

### Mikro

Pemeriksaan struktur mikro dilakukan pada permukaan patahan kepala baut. Ditemukan retakan yang bergerak tegak lurus dari permukaan patahan sepanjang  $\pm 0,5$  mm. Kondisi warna daerah permukaan cenderung lebih cerah dibandingkan bagian dalam. Hal ini menunjukkan jejak dari proses pembuatan kepala baut dengan *cold heading* [15]. Proses ini memberi kekuatan pada kepala baut agar tidak mudah terdeformasi, namun meninggalkan tegangan sisa pada material [16].

Foto struktur mikro menunjukkan bahwa struktur mikro baut adalah martensit temper dengan partikel karbida akibat kandungan kromnya. Struktur mikro ini sesuai dengan spesifikasi material yang akan dijelaskan pada pengujian komposisi kimia.



Gambar 8. Bentuk Retakan

### Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan metoda spektro emisi terhadap baut yang telah patah, dan dilakukan di B4T. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia Baut (% berat)

Unsur	B4T	Mill Certificate
Karbon (C), %	0,400	0,40
Silikon (Si), %	0,237	0,28
Mangan (Mn), %	0,644	0,65
Fosfor (P), %	0,0156	<0,035
Sulfur (S), %	0,0132	<0,035
Krom (Cr), %	0,834	0,90
Nikel (Ni), %	0,045	-
Molibdenum (Mo), %	0,010	-

Komposisi kimia material baja 40Cr ini mendekati spesifikasi, ASTM A 29 Grade 5140 atau JIS SCr 440 [17]. Baja ini merupakan baja karbon medium dengan paduan utamanya adalah krom, selain nikel dan molibdenum.

**Uji Keras**

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui salah satu sifat mekanik baut dengan

metode Vickers pada beban 1 kg. Lokasi uji pada bagian penampang kepala baut yang diperlihatkan pada Gambar 7 dan Gambar 9. Pengujian masing-masing sampel dilakukan pada 2 lokasi, yaitu lokasi 1 yang mengarah ke sisi luar permukaan radial baut dan lokasi 2 yang mengarah ke permukaan patahan. Lokasi uji keras dapat dilihat pada Gambar 9.



**Gambar 9.** Lokasi Uji Keras Vickers pada Kepala Baut

Hasil pengujian kekerasan Vickers dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Kekerasan dengan Metoda Vickers (HV 1 kgf/mm<sup>2</sup>)

Uji ke	Sampel 1		Sampel 2	
	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 1	Lokasi 2
1	353	329	412	344
2	367	323	391	345
3	371	325	391	339
4	376	325	391	345
5	367	329	373	349
6	353	329	371	345

Setelah data hasil uji Vickers dikonversi ke nilai kekerasan Rockwell-C, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Konversi Uji Keras Vickers ke Rockwell C

Sampel 1		Sampel 2	
Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 1	Lokasi 2
37	33	40	35

Hasil pengujian kekerasan yang telah dikonversi ke Rockwell C adalah 33 – 40 HR<sub>C</sub>. Nilai ini tidak jauh berbeda dengan data *mill certificate* yaitu 32 – 39 HR<sub>C</sub>.

**Perhitungan Analisa Tegangan**

Berdasarkan informasi yang diterima bahwa kegagalan pada bolt M64 grade 10,9 terjadi seketika (tidak lebih dari 24 jam) setelah proses pengencangan/*torquing*. Mekanisme pergerakan mur yang terkoneksi dengan ulir pada proses pengencangan akan mengubah gerakan angular menjadi gerakan linier. Hal ini berarti gaya torsi yang diberikan akan memberi beban tarik karena pergerakan ke atas menuju *kepala* (daerah *notch*). Beban tarik yang diakibatkan gaya torsi ketika pengencangan (beban awal) diduga jauh lebih besar pengaruhnya dibandingkan gaya tarik *bending* setelah pengencangan sampai patah (seketika). Perhitungan berikut ini akan membuktikan hal itu.

**Data teknis:**

- Kuat tarik,  $\sigma_u = 1040 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$  {*mill certificate*}
- Kuat tarik,  $\sigma_y = 934 \text{ MPa (N/mm}^2\text{)}$
- Diameter,  $D = 64 \text{ mm}$
- Torsi maksimum yang diaplikasi =  $18165 \text{ N.m} = 18165 \times 10^3 \text{ N.mm}$

**1. Torsional shear**

Perhitungan tegangan geser sewaktu pengencangan baut dan tegangan geser yang diijinkan dapat dilihat pada persamaan (1)-(4)

$$\tau = \frac{Tr}{J} \tag{1}$$

dengan :  $r = \frac{D}{2} = \text{radius baut}$  (2)

$J = \frac{\pi}{32} D^4 = \text{momen inersia polar}$  (3)

Perhitungan :

$r = \frac{D}{2} = \frac{64}{2} = 32 \text{ mm}$

$J = \frac{\pi}{32} D^4 = \frac{\pi}{32} (64)^4 = 1647099,329 \text{ mm}^4$

$\tau_{\text{apli}} = X = \frac{18165 \times 10^3 \times 32}{1647099,329} = 352,872 \text{ MPa}$

Untuk baut **SF** (*Safety Factor*) = 2,75 (dibulatkan **3** agar lebih aman), sehingga batas tegangan maksimum yang diizinkan adalah

$\sigma_{\text{izin}} = \frac{\sigma_y}{3} = \frac{934 \text{ MPa}}{3} = 311,33 \text{ MPa}$  (4)

$\tau_{\text{apli}} > \sigma_{\text{izin}}$

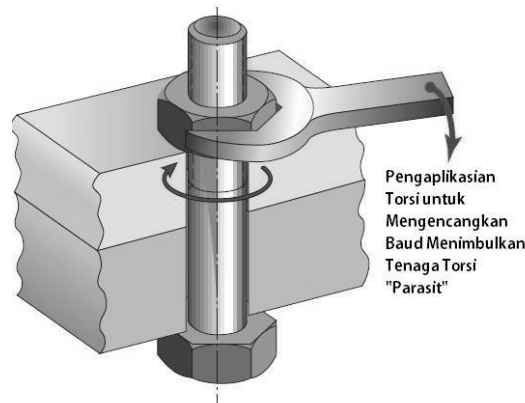
Tegangan geser yang dihasilkan akibat proses pengencangan adalah 352,872 MPa lebih besar dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan. Hal ini yang menyebabkan terjadinya *overload* terhadap baut. Oleh karena itu pemilihan torsi maksimum pada proses pengencangan/*torquing* sesuai dengan batas beban maksimum yang diizinkan.

Berdasarkan perhitungan di atas, besar torsi maksimum yang diizinkan adalah:

$\tau_{\text{apli}} = \sigma_{\text{izin}}$

$T = \frac{\tau \cdot J}{r} = X = \frac{311,33 \text{ MPa} \times 1647099,329 \text{ mm}^4}{32 \text{ mm}}$

$T = 16025 \text{ N.mm}$

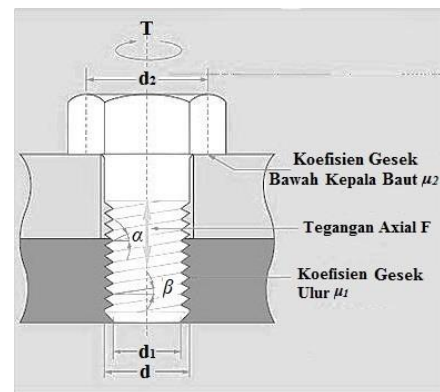


**Gambar 10.** Skema Beban Torsi yang Terjadi Saat Pengencangan Baut [18]

Berdasarkan perhitungan di atas terbukti bahwa telah terjadi *over-torquing* pada proses pengencangan baut M64 grade 10,9. Hal ini membuktikan bahwa material baut juga berbeda antara *grade* 8,8 dan 10,9, yaitu baja 40 Cr pada *grade* 10,9.

## 2. Faktor Koefisien Gesek

Pada proses pengencangan, pergerakan mur di ulir baut akan mengalami gaya gesek. Gaya gesek tersebut sangat ditentukan oleh nilai koefisien gesek antara *thread* mur dan baut, misalnya dengan atau tanpa pelumas. Perhitungan besarnya gaya torsi yang diberikan dengan mempertimbangkan faktor koefisien gesek adalah sebagai berikut.



**Gambar 11.** Koefisien Gesek pada Baut [19]

$T = K \times D \times F$  (5)

dengan :

$K = 1/2 \{ (d_1/d) \tan(\theta + \beta) + (d_2/d) \}$  (6)

$\theta = \tan^{-1} \mu_1 / (\cos \alpha / 2)$

$T = \text{Torsi, N.m}$

K = koefisien, untuk tanpa pelumas dan perlakuan permukaan bernilai 0,2  
 K = koefisien, untuk dengan pelumas dan perlakuan permukaan bernilai 0,1  
 D = diameter utama baut  
 F = gaya awal pada baut sebelum ada pengencangan  
 Coarse series untuk M64 = 6 (berdasarkan BS 3692: 1967)  
 Gaya awal yang direkomendasikan adalah :  
 $F = 0,75A_t\sigma_y$   
 Kuat tarik berdasarkan diameter *pitch* dan minor adalah:

$$A_t = \pi/16 (d_p + d_r)^2 \quad (7)$$

dan untuk *ISO thread*

$$d_p = d - 0,649519 p \quad (8)$$

$$d_r = d - 1,226869 p \quad (9)$$

Perhitungan:

$$d_p = 64 - 0,649519 \times 6 = 60,103 \text{ mm}$$

$$d_r = 64 - 1,226869 \times 6 = 56,639 \text{ mm}$$

$$A_t = \pi/16 (d_p + d_r)^2$$

$$A_t = 2674,63 \text{ mm}^2$$

Data dimasukkan ke

$$F = 0,75A_t\sigma_y$$

$$F = 1873,58 \text{ kN}$$

Data dimasukkan ke

$$T = K \times D \times F$$

Tanpa pelumas:

$$T = 0,2 \times 1873,58 \times 10^3 \times 0,064$$

$$T = 23981 \text{ N.m}$$

$$T_{\text{batas}} > T_{\text{aplikasi}}$$

Hasil perhitungan torsi tanpa pelumas dengan nilai koefisien diasumsi 0,2 didapat 23981 N.m. Nilai ini merupakan batas aman untuk melakukan pengencangan baut. Besar torsi yang diaplikasikan saat pengencangan awal adalah lebih kecil, sehingga seharusnya aman dengan asumsi tanpa pelumas. Hal ini tidak sesuai dengan asumsi awal bahwa telah terjadi torsi berlebih saat pembebanan awal.

Dengan *lubricant*

$$T = 0,1 \times 1873,58 \times 10^3 \times 0,064$$

$$T = 11990,5 \text{ N.m}$$

$$T_{\text{batas}} < T_{\text{aplikasi}}$$

Hasil perhitungan torsi tanpa pelumas dengan asumsi nilai koefisien 0,1 adalah 11990,5 N.m. Nilai ini merupakan batas aman untuk melakukan pengencangan baut. Besar torsi yang diaplikasikan saat pengencangan awal adalah lebih besar, sehingga terjadi *overload* pada baut. Hal ini tidak sesuai dengan asumsi awal bahwa telah terjadi *over-torque* saat pembebanan awal.

## KESIMPULAN

Berdasarkan serangkaian pemeriksaan dan perhitungan analisa tegangan, dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Baut mengalami patah getas akibat kombinasi beban tarik dan *bending*.
2. Ditemukannya indikasi *ratchet mark* dalam jumlah relatif banyak di sekeliling permukaan patahan menunjukkan bahwa terjadi akumulasi konsentrasi tegangan yang tinggi pada bagian yang memiliki radius yang rendah.
3. Berdasarkan hasil perhitungan tegangan, baut mengalami momen puntir yang melebihi kemampuan maksimum material (*over load*). Pengencangan awal yang diberikan adalah 18,625 N.mm, lebih besar dibandingkan batas yang diizinkan yaitu 16,025 N.mm

## SARAN

1. Pada proses pengencangan momen puntir harus lebih rendah dari momen puntir maksimum baut
2. Radius takikan batang dan kepala baut diperbesar untuk mengurangi konsentrasi tegangan
3. Dudukan kepala ketika pengencangan harus rata.
4. Perlu dilengkapi pemeriksaan fraktografi mikro dengan metode SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan kemungkinan kelainan material di daerah inisial retakan

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan di laboratorium metalografi, Seksi Analisis Kerusakan dan Metalografi atas kesempatan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Griza, "The effect of bolt length in the fatigue strength of M24 × 3 bolt studs The effect of bolt length in the fatigue strength of," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 34, no. October, pp. 397–406, 2017.
- [2] S. Izumi, T. Yokoyama, A. Iwasaki, and S. Sakai, "Three-dimensional finite element analysis of tightening and loosening mechanism of threaded fastener," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 12, pp. 604–615, 2005.
- [3] G. L. Kulak, J. W. Fisher, and J. H. A. Struik, "Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints Second Edition", *2nd ed. Chicago: American Institute of Steel Constructon, Inc.*, 2001.
- [4] R. Lacalle, S. Cicero, and D. Ferren, "Failure analysis of a bolt in a scaffolding system," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 15, pp. 237–246, 2008.
- [5] S. Molaei, R. Alizadeh, M. Attarian, and Y. Jaferian, "A failure analysis study on the fractured connecting bolts of a filter press Case Studies in Engineering Failure Analysis," *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 4, no. July, pp. 26–38, 2015.
- [6] Grimsno, E.L. et all, "How placement of nut determines failure mode of bolt-and-nut assemblies", *Steel Construction*, Vol. 10, issue 3, pp. 241-247, 2017.
- [7] ISO 68-1:1998 ISO general purpose screw threads – Basic profile – Part 1: Metric screw threads
- [8] John A. et al, Metal Handbook, 8<sup>th</sup> edition, Vol.9, Fractography and Atlas of Fractograph,pp.36-41, 1974.
- [9] John A. et al, Metal Handbook, 8<sup>th</sup> edition, Vol.9, Fractography and Atlas of Fractograph,pp.43-46, 1974.
- [10] Neville W. Sachs, "Jurnal of Failure and Preventior, *ASM Inter Natiral*, Vol. 5 (2), pp.12, 2015.
- [11] [www.wonderlodgegurus.com/database/Theory/surface of fatyue fractures.pdf](http://www.wonderlodgegurus.com/database/Theory/surface%20of%20fatyue%20fractures.pdf)
- [12] John A. et al, Metal Handbook, 8<sup>th</sup> edition, Vol.9, Fractography and Atlas of Fractograph,pp.27-28, 1974.
- [13] Nunes R. et al, ASM handbook, Vol. 14, Forging and Forming, 1988.
- [14] Adams BL et al, ASM handbook, Vol. 9, Metallography and microstructures, pp. 5-10, 2004.
- [15] DeGarmo E.P, Black J.T., Kohser R.A., Materials and processes in manufacturing, 8<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons, Inc, pp. 499-502, 1999.
- [16] DeGarmo E.P, Black J.T., Kohser R.A., Materials and processes in manufacturing, 8<sup>th</sup> edition, John Wiley and Sons, Inc, pp. 84-85, 1999.
- [17] ASTM A29 / A29M - 16, Standard Specification for General Requirements for Steel Bars, Carbon and Alloy, Hot-Wrought
- [18] SKP Bolt-EighTening Handbook, France, pp. 9, 2001.
- [19] <http://www.wtools.com.tw/Relation-Formula.shtml>

