FENOMENA FATIK PADA BAUT PENYEBAB KERUSAKAN PISTON MESIN DIESEL SUATU UNIT ALAT BERAT BULDOZER

FATIGUE PHENOMENON CAUSE OF BOLT FAILURE AT PISTON ENGINE BULLDOZER HEAVY EQUIPMENT

Eka Febriyanti

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan Email : <u>Eka.Ndut@gmail.com</u>

Diterima (received) : 04-05-2014, Direvisi (reviewed) : 25-05-2014 Disetujui (accepted) : 03-07-2014.

Abstrak

Baut merupakan komponen penting suatu mesin diesel pada sebuah unit alat berat buldozer yang salah satunya berfungsi untuk mengencangkan komponen piston. Oleh karena itu, menyebabkan baut tersebut sering mengalami pembebanan tarik dan torsi dalam pengoperasiannya. Pada penelitian ini menunjukkan bahwa baut rusak selama mesin diesel beroperasi. Untuk mengetahui detail penyebab utama kerusakan yang terjadi pada baut perlu dilakukan analisis yang mendalam. Tahapan yang dilakukan antara lain pemeriksaan visual, pengamatan fraktografi dari permukaan patahan baut dengan menggunakan SEM, pengamatan metalografi, pengujian kekerasan, pengujian tarik, dan analisis komposisi kimia material baut. Dari hasil pengamatan dan pengujian menunjukkan bahwa kerusakan baut disebabkan karena pembebanan fatik dimana kerusakan awal ditandai dengan adanya deformasi plastis berupa indentasi/penjejakan di permukaan luar baut. Oleh karena itu, ketidaksesuaian dalam mekanisme pengencangan dan penjepitan piston menyebabkan terjadinya indentasi/penjejakan. Indentasi/penjejakan di permukaan luar baut berperan sebagai peningkat tegangan. Dengan adanya kehadiran cacat material seperti inklusi MnS seperti yang terlihat dari hasil pengamatan metalografi, ditambah dengan getaran, tegangan tarik, dan torsi selama pengoperasian maka retak fatik terbentuk dari indentasi/penjejakan dan merambat sampai material baut tidak dapat menahan beban dan akhirnya patah.

Kata kunci : baut, inklusi, indentasi, getaran, fatik

Abstract

Bolt is important component of diesel engine in bulldozer heavy equipment which has function to tight a piston component, so bolt generally experiences tensile load and torque load in its operation. In this research, showed that the bolt failed during diesel engine operation. Therefore, it is necessary to do a detailed analysis of the main causes bolt failure. Observation and examination include visual observation, fracture surface observation by Scanning Electron Microscope (SEM), metallographic examination, hardness test, tensile testing, and chemical composition analysis by optical emission spectroscopy. Detail analysis of the failed bolt was caused by fatigue failure. The failure of bolt was initiated by plastic deformation such as indentation on the outer bolt surface. Incompatibility of clamping and tightening mechanism is allegedly the caused of the indentation on the bolt. The indentation on outer bolt surface acts as stress riser. With the presence of material defect such as MnS inclusion from metallographic examination, vibration, tensile and torque residual stress during operation, fatigue crack formed and propagated until material is no longer able to withstand load that resulted final fracture.

Key words : bolt, inclusion, indentation, vibration, fatigue

1. PENDAHULUAN

Piston, cincin piston, dan connecting rod merupakan komponen penting dalam mesin diesel seperti yang terlihat pada Gambar 1. Mungkin, tidak ada bagian lain dalam mesin diesel yang dibebankan dengan panas, tekanan, dan gaya berlebih seperti yang dialami oleh piston. Selama pengoperasian mesin normal, temperatur di dalam piston sebesar 1200-1300°F (650-700°C), sementara selama shutdown, temperatur dalam piston merupakan temperatur ambient (temperatur sekeliling mesin atau temperatur atmosferik)



Gambar 1. Perakitan piston dan connecting rod

Oleh karena itu, piston harus mampu menerima perubahan temperatur secara ekstrim dalam pengoperasiannnya secara normal tanpa rusak sehingga piston harus dibuat dari material yang sangat kuat seperti paduan aluminum, campuran tembaga, silikon, magnesium, mangan, besi, dan timbal.

Biasanya, piston suatu mesin diesel bertipe *trunk* seperti yang terlihat pada Gambar 2, walaupun untuk beberapa mesin diesel (biasanya untuk mesin yang yang kalibernya lebih besar) menggunakan piston jenis *crooshead* seperti yang terlihat pada Gambar 3. Desain dari piston tipe *crosshead* dipastikan hampir mengurangi beban dorong dari

piston, sehingga hal ini dapat menurunkan nilai keausan dan meningkatkan umur sisa dari material cincin pistonnya.

Pada kedua jenis penampakan piston tersebut, gambaran komponen-komponennya sangatlah jelas. Namun, dalam penelitian kali ini hanya mengkhususkan pada kerusakan di baut (*bolt*) pada piston (lihat lingkaran pada Gambar 1 dan 3)..



Gambar 2. Piston tipe *trunk* [1,2]



Gambar 3. Piston mesin diesel bertipe cross head

Baut (bolt) merupakan komponen pengencang alat suatu unit berat buldozer. Dalam pengoperasiannya, baut mengalami pembebanan tarik dan torsi. Apabila terjadi kerusakan pada komponen baut tersebut maka mengakibatkan mesin diesel berhenti beroperasi. Oleh karena itu, jika terjadi kerusakan pada mesin diesel, analisa kerusakan harus segera dilakukan untuk mencari penyebab kerusakan tersebut agar dapat ditentukan langkah-langkah penanggulangan untuk mencegah terjadinya pengulangan kerusakan yang sejenis. Pada suatu unit industri alat berat di Indonesia vaitu buldozer pernah ditemukan kerusakan di mesin diesel. Setelah dilakukan pemeriksaan ternyata ada beberapa komponen baut pada piston yang terindikasi rusak, kemudian komponen baut tersebut diteliti dan dianalisa di laboratorium analisa

kerusakan B2TKS-BPPT untuk dicari penyebab kerusakan yang terjadi pada mesin diesel tersebut.

2. METODOLOGI

Komponen baut pada piston dari mesin diesel yang mengalami kerusakan diperiksa di laboratorium analisa kerusakan B2TKS-BPPT.



Gambar 4. Diagram alir pemeriksaan dan pengujian terhadap baut pada piston

Pemeriksaan benda uji mencakup pemeriksaan visual pada daerah yang rusak, pengamatan

fraktografi dengan menggunakan mikroskop stereo untuk mengetahui karakteristik permukaan baut yang mengalami patahan, pengamatan metalografi dengan mikroskop optik untuk memeriksa kondisi struktur mikro, cacat mikrostruktur, dan perubahannya, uji kekerasan dengan *hardness vickers machine*, analisis komposisi kimia material dengan menggunakan *optical emission spectrometer*, analisis permukaan retakan dan permukaan patahan baut menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM), serta uji komposisi deposit dengan metode *Energy Dispersive X-Ray* (EDX).

Metode pengujian dan pemeriksaan terhadap baut pada piston suatu unit alat berat buldozer dapat dilihat dengan diagram alir pada Gambar diatas. Berikut merupakan gambaran dari baut di piston yang rusak pada suatu unit alat berat buldozer yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Kondisi visual benda uji baut pada piston suatu unit alat berat *bulldozer*.

Ketiga permukaan material baut suatu piston unit alat berat *buldozer* terdiri atas baut *new* seperti yang terlihat pada Gambar 5A, baut *redo* yang patah seperti yang terlihat pada Gambar 5B, dan baut *redo* yang tidak patah seperti yang terlihat pada Gambar 5C. Sedangkan data benda uji baut pada *piston adalah sebagai berikut (spesifikasi material baut) :*

- Material baut : steel
- Standard material : ASTM A 325
- Panjang baut : 6 cm
- Diameter baut : 8 mm

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemeriksaan Visual

Pemeriksaan visual pada baut *new* tidak menunjukkan adanya gejala kerusakan seperti retak, void, porositas, dan lain lain, seperti yang terlihat pada Gambar 6.

Agustus 2014/Vol. 16/No 2

Sedangkan dari hasil pemeriksaan pada baut redo yang tidak patah menunjukkan adanya retak pada sisi kiri dan kanan baut (lihat lingkaran) seperti yang terlihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Potongan memanjang baut *new* (Perbesaran Gambar 5A)



Gambar 7. Potongan memanjang baut *redo* yang tidak patah (Perbesaran Gambar 5C)



Gambar 8. Penampang permukaan ulir baut *redo* yang patah (Perbesaran Gambar 5B)

Untuk hasil pemeriksaan baut redo yang patah menunjukkan adanya permukaan ulir yang terdeformasi plastis seperti yang terlihat pada Gambar 8a. Pada potongan baut redo yang patah material menunjukkan adanya tanda baut terdeformasi plastis berupa indentasi seperti yang terlihat pada Gambar 8b. Awal patahan diindikasikan berasal dari sisi permukaan luar baut yang mengalami deformasi plastis.



Gambar 9. Potongan memanjang baut *redo* yang patah

3.2 Pemeriksaan Fraktografi

Hasil pemeriksaan fraktografi pada permukaan baut *redo* yang patah memperlihatkan adanya daerah perambatan retak (lihat panah) di Gambar 10 dan patahan sisa yang membentuk sudut patahan sebesar 45° (lihat panah) di Gambar 11. Patahan tersebut menunjukkan bahwa perpatahan material baut merupakan jenis perpatahan *ductile* atau ulet.



Gambar 10. Permukaan baut redo yang patah

JSTI : Fenomena Fatik Pada...(Eka Febriyanti)



Gambar 11. Patahan sisa baut redo yang patah



Gambar 12. Perbesaran dari Gambar 10

3.3 Pemeriksaan Metalografi

Pemeriksaan struktur mikro dilakukan pada penampang baut *new*, baut *redo* yang tidak patah, dan baut *redo* yang patah. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa mikrostruktur ketiga baut tersebut masing-masing berupa matrix martensite temper, seperti yang terlihat pada Gambar 13-18.

Pada sampel baut *new* menunjukkan adanya inklusi MnS (Gambar 14). Sedangkan pada baut *redo* yang tidak patah dan baut *redo* yang patah keduanya menunjukkan adanya oksida MnO dan inklusi MnS seperti yang terlihat pada Gambar 15-16 dan Gambar 18.

Selain itu, dari hasil pemeriksaan metalografi baut redo yang tidak patah dan patah keduanya juga menunjukkan adanya retak mikro yang diindikasikan dari sisi permukaan luar baut seperti yang terlihat pada Gambar 15 dan Gambar 17.



Gambar 13. Mikrostruktur baut *new* terdiri atas matrix martensite temper. Perbesaran : 500 x. Etsa : nital 2 %



Gambar 14. Mikrostruktur baut *new* di daerah tengah terdiri atas matrix martensite temper dan inklusi MnS. Perbesaran : 500 x. Etsa : nital 2 %



Gambar 15. Mikrostruktur baut *redo* yang tidak patah di daerah retak terdiri atas matrix martensite temper dan inklusi MnS. Perbesaran : 200 x. Etsa : nital 2 %



Gambar 16. Mikrostruktur baut *redo* yang tidak patah di daerah tengah terdiri atas matrix martensite temper, oksida MnO (daerah gelap), dan inklusi MnS (daerah terang). Perbesaran : 500 x. Etsa : nital 2 %



Gambar 17. Mikrostruktur baut *redo* yang patah di sisi kiri terdiri atas matrix martensite temper. Perbesaran:200xEtsa : nital 2 %



Gambar 18. Mikrostruktur baut *redo* yang patah di tengah terdiri atas matrix martensite temper oksida MnO (daerah gelap), dan inklusi MnS (daerah terang). Perbesaran : 500 x. Etsa : nital 2 %

3.4 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan pada baut *new, redo* yang tidak patah, dan *redo* yang patah dilakukan untuk mengetahui perubahan sifat kekerasannya^[7]. Alat uji kekerasan menggunakan *Hardness Vickers Tester*. Hasilnya masing-masing dapat dilihat pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Dari hasil pengujian kekerasan pada sampel material baut *new, redo* yang tidak patah, dan *redo* yang patah menunjukkan bahwa nilai kekerasan masing-masing material berkisar antara 336 - 345 HV, 347 - 362 HV, dan 347 - 352 HV. Hal ini menunjukkan kesesuaian terhadap nilai kekerasan mikrostruktur martensite temper.



Gambar 19. Lokasi pengujian kekerasan material baut *new* (Tanda X).

Tabel	1.	Hasil	pengujian	kekerasan	material	baut
		new				

No.	Kekerasan (HV)
1	345
2	336
3	341
Rata-rata	340

Sumber : Hardness Vickers Tester



Gambar 20. Lokasi pengujian kekerasan material baut *redo* yang tidak patah (Tanda X)

No.	Kekerasan (HV)		
1	359		
2	353		
3	347		
4	347		
5	362		
Rata-rata	353		

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan material baut *redo* yang tidak patah

Sumber : Hardness Vickers Tester



_ Tanda terdeformasi plastis

Gambar 21. Lokasi pengujian kekerasan material baut *redo* yang patah (Tanda X)

Tabel 3. Hasil pengujian kekerasan material baut *redo* yang patah

No.	Kekerasan (HV)
1	347
2	352
3	347
4	347
5	347
Rata-rata	348

Sumber : Hardness Vickers Tester

3.5 Analisis Komposisi Kimia

Untuk analisis komposisi kimia material baut dan standard material ASTM A325-10 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi kimia material baut dengan standard material ASTM A325-10.

В	laut	Standard ASTM A325-10				
Unsur	wt %	Unsur	wt %			
С	0.296	С	0.14-0.26			
Si	0.260	Si	0.13-0.37			
Mn	0.793	Mn	0.76-1.39			
Ni	0.085	Ni	0.22-0.53			
Cu	0.227	Cu	0.17-0.53			
V	0.007	V	0.010 min.			
S	0.003	S	0.045 max.			
Р	0.013	Р	0.040 max.			
Fe	97 048	Fe	Rem			

Sumber : Optical Emission Spectrometer (OES)

JSTI : Fenomena Fatik Pada...(Eka Febriyanti)

Dari hasil analisis komposisi kimia menunjukkan bahwa material baut pengencang piston sesuai dengan standard material ASTM A 325-10.

3.6 Pengujian Tarik

Pengujian tarik pada baut new dan baut redo yang patah dilakukan untuk mengetahui sisa kekuatan material dan untuk mengetahui apakah sifat mekanik dari baut yang patah telah berubah setelah sekian lama beroperasi. Hasil uji tarik antara sampel 1 (baut *new*) dan 2 (baut *redo* yang tidak patah) dapat dilihat pada Tabel 5. Dari table tersebut dapat dilihat bahwa *yield strength* dari baut *new* dan *redo* yang tidak patah relative sama yaitu sekitar 1076 dan 1073 N/mm², dengan *tensile strength* (UTS) yaitu masing-masing sekitar 1174 dan 1138 N/mm².

Tabel	5.	Hasil	uji	tarik	statis	terhadap	material	baut
		pada p	oisto	on sua	itu uni	t alat bera	at bulldoz	zer

Specimen	Tensile strength (N/mm ²)	Yield strength (N/mm ²)	Elongation (%)	
Baut new	1174.0	1076.2	16.0	
<i>Baut red</i> o tidak patah	1138.7	1073.2	18.0	

Sumber : Mesin Uji Tarik UPM 1000

3.7 Analisis SEM-EDAX

Hasil analisis dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) pada permukaan baut *redo* yang patah menunjukkan adanya indikasi fatik berupa striasi (perambatan retak) yang dapat dilihat pada Gambar 22.



Gambar 22. Permukaan patahan baut *redo* yang patah menunjukkan adanya indikasi fatik berupa striasi

Sedangkan dari hasil analisa EDX (*Energy Dispersive X*-ray) tidak ditemukan adanya kandungan elemen-elemen korosif/agresif yang memicu terjadinya patah pada baut seperti yang terlihat pada Gambar 23 dan Tabel 6.



Gambar 23. Hasil analisa EDX baut *redo* yang patah

Tabel 6. Hasil analisa EDX baut redo yang patah

Unsur	Hasil Analisa EDAX (wt %)
С	37.20
Al	0.46
Si	0.82
Cr	0.94
Fe	60.58
Total	100

Sumber : Mesin Uji SEM-EDX (Energy Dispersive X-ray)

3.8 Pembahasan

Baut merupakan komponen penting suatu mesin diesel di dalam suatu unit alat berat buldozer. Fungsi komponen ini yaitu untuk mengencangkan komponen khususnya piston pada mesin diesel. Oleh karena itu, umumnya komponen ini mengalami pembebanan berupa beban tarik dan beban torsi dalam pengoperasiannya. Apabila komponen ini rusak maka seluruh sistem mesin otomatis berhenti seketika.

Material yang digunakan untuk ketiga baut (new, redo yang tidak patah, dan redo yang patah) adalah baja karbon yang mengalami heat treatment berupa full hardening dan tempering sehingga mikrostrukturnya berupa martensite temper seperti yang terlihat pada Gambar 13-Gambar 18. Pada sampel baut new memperlihatkan adanya inklusi MnS (Gambar 14). Sedangkan pada baut redo yang tidak patah dan baut *redo* yang patah masing-masing memperlihatkan oksida MnO dan inklusi MnS seperti yang terlihat pada Gambar 15-16 dan Gambar 18). Dari hasil pemeriksaan metalografi baut redo yang tidak patah dan patah keduanya menunjukkan adanya retak yang diindikasikan dari sisi permukaan luar baut seperti yang terlihat pada Gambar 15 dan Gambar 17.

Hasil pengujian kekerasan material baut seperti yag terlihat pada Tabel 1-3 memperlihatkan bahwa baut *redo* yang tidak patah dan baut *redo* yang patah keduanya mempunyai nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan baut *new*. Ini adalah bukti bahwa kedua material baut (*redo* yang tidak patah dan redo yang patah) mengalami mekanisme work *hardening* akibat deformasi plastis selama pengoperasian dan sebelum terjadinya patah. Sedangkan, hasil uji komposisi kimia material baut dapat dilihat pada Tabel 4.

Dari hasil uji tarik statis antara baut *new* dan *redo* yang tidak patah dapat dilihat bahwa *yield strength* dari baut new dan redo yang tidak patah relatif sama yaitu sekitar 1076 dan 1073 N/mm², dengan *Ultimate Tensile Strength* (UTS) masing-masing sekitar 1174 dan 1138 N/mm² (lihat pada Tabel 5).

Dari hasil pemeriksaan ditemukan data bahwa :

- Retak berada pada sisi permukaan luar baut (Gambar 7-8, Gambar 15, dan Gambar 17)
- Kerusakan / perpatahan baut dimulai pada sisi permukaan luar baut yang mengalami deformasi plastis (Gambar 9, Gambar 20-21)
- Terdapat cacat material berupa inklusi MnS seperti yang terlihat pada Gambar 15-16 dan 18 dan oksida MnO seperti yang terlihat pada Gambar 16 dan Gambar 18
- Terdapat striasi pada permukaan patáhan seperti yang terlihat pada Gambar 22
- Tidak terdapat indikasi failure akibat kerusakan lain seperti korosi ataupun *overheating*

Jadi, dapat disimpulkan bahwa penyebab patahnya baut adalah akibat adanya deformasi plastis dari sisi permukaan luar baut berupa indentasi yang diperoleh dari ketidaksesuaian dalam pengoperasian mekanisme pengikatan (*clamping*) dan pengencangan (*tightening*) baut. Deformasi pada permukaan luar baut berperan sebagai konsentrasi tegangan sehingga *initial crack* muncul. Ditambah dengan adanya cacat material berupa inklusi MnS dan oksida MnO dari hasil pengamatan metalografi serta beban operasi berupa tarik, torsi, serta kehadiran *vibrasi* dari mesin diesel maka dapat mempercepat perambatan retak fatik sampai material tidak mampu lagi menahan beban hingga akhirnya patah.

4. KESIMPULAN

 Kerusakan baut disebabkan oleh fenomena fatik dan diawali dengan adanya indentasi/jejak. Terjadinya indentasi disebabkan karena mekanisme pengikatan (*clamping*) dan pengencangan (*tightening*) baut yang salah/tidak sesuai.

• Perambatan retak fatik dipercepat dengan adanya cacat material berupa inklusi MnS dan oksida MnO, beban operasi berupa tarik dan torsi, serta kehadiran getaran dari mesin diesel sampai material baut tidak mampu lagi menahan beban hingga akhirnya patah

Adapun Saran yang bisa disampaikan adalah :

- Pada baut lainnya (yang tidak patah) sebaiknya diinspeksi secara rutin untuk meyakinkan tidak ada indikasi retak. Apabila ada retak yang terdeteksi, baut sebaiknya diganti secepatnya.
- Mencegah mekanisme pengencangan (*tightening*) yang salah dan berlebihan
- Ketika penggantian material baut sebaiknya berdasar pada spesifikasi komponen/part asli/awalnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Dagel John F., 2001. "Piston, Piston Rings, and Connecting Rod Assembly", Diesel Engine Repair, p.126-127
- Oppenheim, K.Antoni, 2004. "Combustion in Piston Engines Technology, Evolution, Diagnosis, and Control", Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, New York.
- Marshall, Brain, "Basic Engine Parts", http://auto.howstuffworks.com/engine2.htm
- Standard Testing of ASTM, 1998. "Vol 01.01 ASTM A 325-10 : Standard Specification for Structural Bolts, Steel, Heat Treated, 120/105 ksi minimum tensile strength", ASTM Standard,Ninth Edition, American Standard of Testing Material, Ohio.
- ASM Handbook Committe, 1998, "Vol 1 ; Properties and selection : Irons, Steel, and High Performance Alloy", Metal Handbook of ASM, Ninth Edition, American Society for Metals,Ohio.
- ASM Handbook Committe, 1998, "Vol 12 : Fractography", Metal Handbook of ASM, Ninth Edition, American Society for Metals,Ohio.
- Chen, Hsing-Sung, et.al., 2006. "Failure Analysis of Bolts on an End Flange of A Steam Pipe", Engineering Failure Analysis, 13, pp. 656-668
- Lacalle, R., 2008. "Failure Analysis of A Bolt in A Scaffolding System", Engineering Failure Analysis, 15, pp. 237-246

- ASM Handbook Committe, 1998, "Vol 9 : Metallography", Metal Handbook of ASM, Ninth Edition, American Society for Metals,Ohio.
- Hernandez, V.H Baltazar, et.al.,2011. "Tempering of Martensite in Dual-Phase Steels and Its Effects on Softening Behaviour", Metal. and Mater. Transaction A, May, pp.1-15
- M.Sohaciu, et.al.,2013. "Influence of MnS Inclusions in Steel Parts on Fatigue Resistance", Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (8) (1), pp.367-376
- W.Gjonnes, Anders, 2012. "Effect of Sulfide Inclusions in Austenitic Stainless Steel on The Initiation of Pitting in Base Metal and Heat Affected Zone after Welding", Master Thesis, NTNU Trodheim, Norwegia, pp.1-86
- Grange, R.A., Hribal C.R., Porter L.F., 2009. "Hardness of Tempered Martensite in Carbon and Low-Alloy Steels", Metallurgical and Material Transactions, (19) (11), pp. 1175-1785
- Yu, Zhiwei, Xiaolei Xu, 2008. "Failure Analysis of Connecting Bolts and Location Pins Assembled on The Plate of Main Shaft Used in Locomotive Turbocharger", Engineering Failure Analysis, 15, pp. 471-479
- Yu, V.Y., et.al., 2005. "Failure Analysis of The M16 Rifle Bolt", Engineering Failure Analysis, 12, pp. 746-754
- Behjati, P., A.R.Etemadi, et.al. 2009., "Failure Analysis of Holding U-Bolts of An Automobile Wheels", Engineering Failure Analysis, 16, pp. 1442-1447
- Casanova, Fernando, "Failure Analysis of The Draft Tube Connecting Bolts of Francis-type Hydroelectric Power Plant", Engineering Failure Analysis, 16 (2009), pp. 2202-2208
- Callister, William D Jr., 2003, "Material Science and Engineering An Introduction", John Wiley and Sons Inc., New York, p.179
- ASM Handbook Committe, 1998, "Vol 11 : Failure Analysis and Prevention", Metal Handbook of ASM, Ninth Edition, American Society for Metals,Ohio.
- Davidson, Thomas, 1999. "Case Study:Crane Bolt Failure",TMS Outstanding Student Paper Contest Winner Undergraduate Divison.
- Yu, Zhiwei, Xiaolei Xu, 2006. "Failure Analysis of Diesel Engine Cylinder Head Bolts", Engineering Failure Analysis, 13, pp. 826-834

JSTI : Fenomena Fatik Pada...(Eka Febriyanti)