

ANALISIS KEGAGALAN BAUT PENGIKAT *GEARBOX* PADA LOKOMOTIF KERETA REL DIESEL ELEKTRIK (KRDE)

* Wahyu Setia Aji¹, Sri Nugroho²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: wahyusetia.aji09@gmail.com

ABSTRAK

Analisa kegagalan merupakan metode investigasi secara sistematis untuk mencari penyebab mekanisme kegagalan suatu komponen atau peralatan. Penelitian ini menjelaskan tentang analisa kegagalan baut pengikat *gearbox* pada lokomotif kereta rel diesel elektrik (KRDE). Baut mengalami patah pada pengoperasian selama 8 bulan. Baut berstandar SAE J429 *Medium Carbon Grade 5* dengan dimensi panjang 6 inch, diameter luar (d) 25,4 mm, diameter efektif (d_2) 23,34 mm, jarak bagi (p) 3,175 mm dan jumlah ulir 8/inch. Metode yang digunakan antara lain studi literatur, pengamatan visual dan pengumpulan data, analisa tegangan, uji komposisi, uji metalografi, uji kekerasan serta pengolahan data dan analisa hasil pengujian. Dari hasil pengamatan visual terlihat adanya tanda *beachmark* yang sering dijumpai di kasus patah lelah dan kehadirannya pertanda positif bahwa material uji mengalami patah lelah. Tegangan geser yang terjadi sebesar 96,71 MPa dan *safety factor* (Sf) sebesar 3,5. Dari uji komposisi terlihat bahwa baut sesuai dengan standar SAE J429. Namun uji kekerasan menunjukkan nilai kekerasan yang tidak sesuai yaitu antara 23,5 – 28,88 HRC. Diperkuat dengan uji metalografi yang memperlihatkan ukuran butir tidak merata dan fasa yang berupa ferrite dan perlite. Disimpulkan bahwa baut mengalami kegagalan akibat patah lelah yang dipercepat dengan proses *quench and temper* yang tidak sempurna pada saat baut diproduksi.

Kata kunci : Analisa kegagalan, baut SAE J429, *beachmark*, patah lelah

ABSTRACT

*Failure analysis is a systematic method of investigation to find the cause of the failure mechanism of a component or equipment. This study describes the analysis of the failure of the bolts fastening the gearbox on the diesel electric locomotive train (KRDE). Suffered a broken bolt in operation for 8 months. Bolt SAE standard J429 Grade 5 Medium Carbon with dimensions of length 6 inch, outer diameter (d) 25.4 mm, the effective diameter (d_2) 23.34 mm, the pitch (p) 3.175 mm and the number of threaded 8 / inch. Methods used include literature, visual observation and data collection, stress analysis, composition test, metallographic test, hardness test, data processing and analysis of test results. From visual observations *Beachmark* visible signs are often found in cases of fatigue fracture and the presence of positive sign that the test material had broken fatigue. Shear stress occurs at 96.71 MPa and a safety factor (Sf) of 3.5. Seen that the composition of the test bolts in accordance with SAE J429 standard. But the hardness test showed unequal hardness value of between 23.5 to 28.88 HRC. Reinforced with metallographic test showing uneven grain size and phase in the form of ferrite and perlite. Concluded that the bolts have failed due to fatigue fracture accelerated with quench and tempering process which is not complete at the bolts produced.*

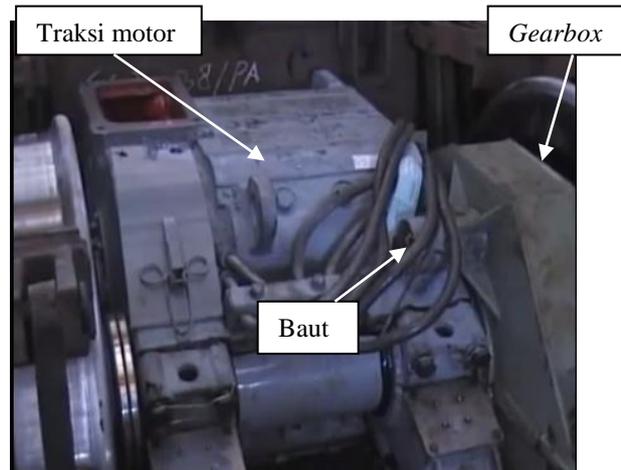
Keywords : *Failure analysis, bolt SAE J429, beachmark, fatigue fracture*

1. Pendahuluan

Analisis kegagalan merupakan metode investigasi secara sistematis untuk mencari penyebab mekanisme kegagalan suatu komponen/peralatan. Serta memberikan rekomendasi atau menawarkan solusi untuk mengatasi masalah yang timbul. Pada bidang transportasi khususnya kereta rel diesel elektrik (KRDE) sering terjadi adanya komponen yang mengalami kegagalan. Salah satunya adalah baut pengikat traksi motor pada lokomotif diesel. Baut ini berfungsi sebagai pengikat *gearbox* dengan traksi motor. Dimana fungsi *gearbox* sebagai pelindung dan pengaman roda gigi penggerak lokomotif (*Bull gear*) dan roda gigi *pinion* (*Pinion gear*) traksi motor sekaligus sebagai tempat menampung minyak pelumas roda gigi tersebut.

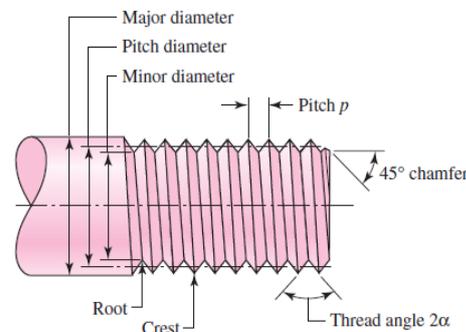
Traksi motor adalah sebuah motor listrik yang berfungsi sebagai penggerak roda pada Kereta Rel Listrik (KRL) maupun Kereta Rel Diesel Elektrik (KRDE). Pada lokomotif diesel elektrik, tenaga yang dihasilkan dari ruang bakar mesin diesel akan memutar generator untuk menghasilkan listrik. Kemudian listrik yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan traksi motor. Traksi motor dapat dilihat pada gambar 1 berikut ini.

Gearbox dibagi 2 bagian yaitu atas dan bawah yang dibuat dari bahan besi plat dengan tebal 8 mm pada sisi motor dan 6 mm pada sisi roda. *Gearbox* atas dilengkapi dengan sebuah baut pengikat pada traksi motor dan *gearbox* bawah dilengkapi dengan 2 buah baut pengikat masing-masing 1 buah pada sisi motor dan sebuah pada sisi samping, baut-baut tersebut berdiameter 1 inchi. Disamping itu *gearbox* atas dan bawah pada kedua ujungnya diikat dengan klem dan baut berukuran $\frac{3}{4}$ inchi. Isi pelumas *gear box* adalah 3,2 kg, sedangkan berat *gearbox* sendiri adalah 95 kg. Nilai torsi pengencangan baut *gearbox* antara 440-495 lb/ft dan baut klem *gearbox* antara 180-205 lb/ft. Untuk pemasangan *gearbox* dengan traksi motor dapat dilihat pada gambar 1 [1].

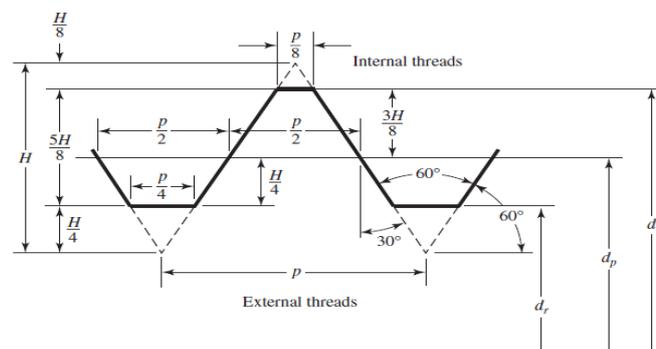


Gambar 1. Pemasangan *gearbox* dengan traksi motor [1]

Baut merupakan salah satu alat untuk membantu mengikat antar komponen. Baut sangat erat kaitannya dengan ulir, dalam pemakaian ulir selalu bekerja berpasangan antara ulir luar dan ulir dalam. Secara garis besar ulir dibedakan menjadi seri ulir halus (UNF) dan seri ulir kasar (UNC). Pada gambar 2 dan 3 dapat dilihat secara jelas tentang gambaran baut dan ulir.

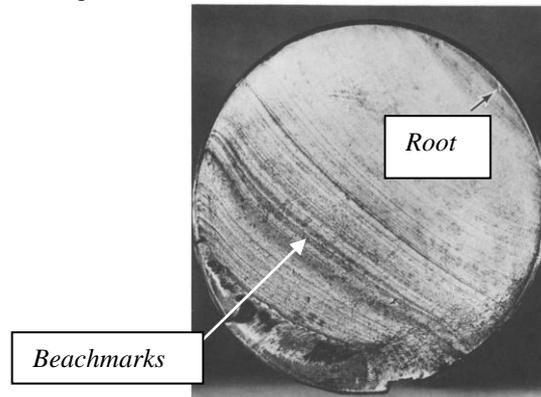


Gambar 2. Baut [2]



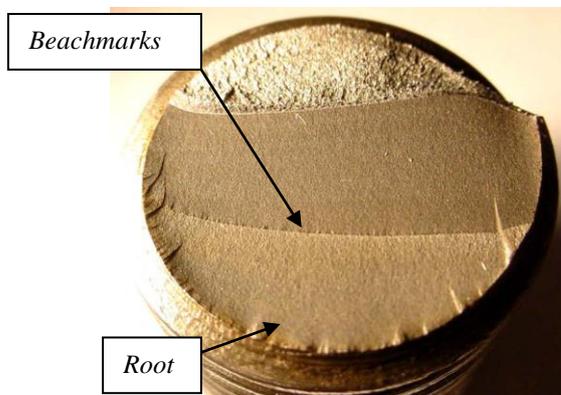
Gambar 3. Ulir [2]

Fatigue atau lelah adalah bentuk dari kegagalan yang terjadi pada struktur yang disebabkan karena beban dinamik yang berfluktuasi dibawah kekuatannya yang terjadi dalam waktu yang lama dan berulang-ulang. Retak *fatigue* biasanya bermula dari permukaan yang merupakan tempat beban berkonsentrasi. *Fatigue* menyerupai patah getas yaitu ditandai dengan deformasi plastis yang sangat sedikit. Proses terjadinya *fatigue* ditandai dengan retak awal, perambatan retak dan patah akhir. *Beachmarks* adalah fitur unik yang ditemukan dibanyak kasus kelelahan dan kehadiran mereka merupakan sarana positif untuk mengidentifikasi fraktur kelelahan. *Beachmarks* dapat dilihat pada gambar 4 [3].

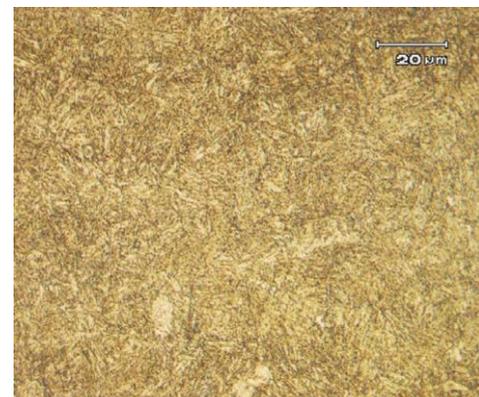


Gambar 4. Axel baja karbon-sedang dengan fraktur kelelahan di sebagian besar penampang sebelum pecah akhir [3]

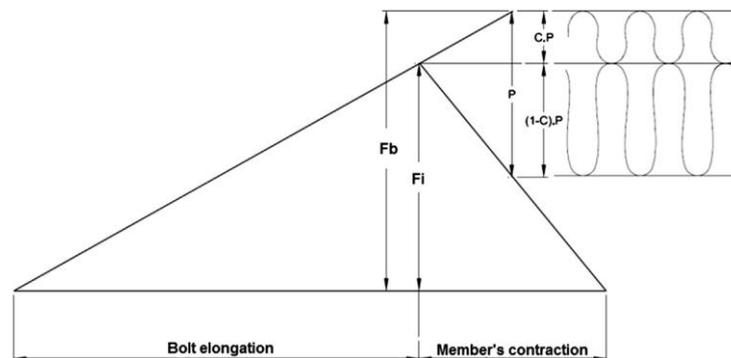
Pada penelitian yang dilakukan Sandro griza & Marcio Erick G dari universidade Federal do Rio Grande, Brazil mengenai baut perakit rumah kompresor. Baut yang digunakan adalah M24x3 kelas 8.8. Kekuatan kelelahan meningkat dengan meningkatnya panjang *stud bolt*. Metode yang digunakan antara lain *Mechanical and microstructure characterization*. Fraktur datar dengan ditandai *beachmarks* yang diikuti oleh fraktur akhir adalah fitur khas kelelahan (Gambar 5). Baut ini juga mengalami tempering sehingga struktur mikro bagian luar berbentuk martensit (Gambar 6). Dalam studi ini menerangkan bahwa meningkatkan panjang baut untuk torsi pengencangan yang sama cenderung meningkatkan kekuatan kelelahan (Gambar 7). Dan analisis fraktur menunjukkan aspek propagasi kelelahan nukleasi di beberapa titik di sepanjang perimeter dari satu *thread root* [4].



Gambar 5. Patah lelah pada baut M24x3[4]



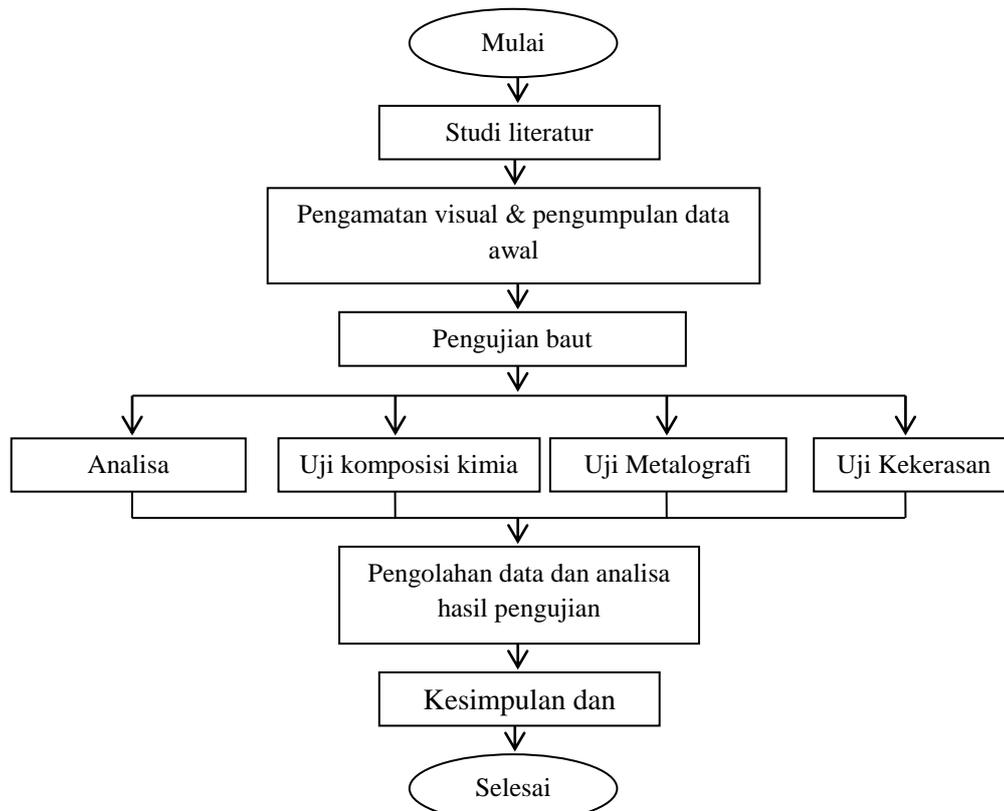
Gambar 6. Martensit tempered dari AISI 4140 baja yang digunakan dalam pembuatan baut[4]



Gambar 7. Diagram beban terhadap pemanjangan sambungan baut mengalami beban aksial *eksternal* [4]

2. Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian berisi tentang langkah-langkah pengujian untuk menganalisa struktur dan sifat mekanik dari spesimen yang diuji. Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8 dibawah ini.



Gambar 8. Diagram alir

Baut yang diteliti merupakan baut jenis baja SAE J429 merupakan baja karbon menengah dengan kandungan karbon antara 0,25 – 0,55 % wt. Unsur tambahan yang lain seperti *Phospor* (P) maksimal 0,025% wt, *Sulfur* (S) maksimal 0,025⁴ %wt. Baja ini mendapatkan perlakuan *Quenched & Tempered* dengan suhu *tempering* minimal 425⁰ C. Baut SAE J429 Grade 5 mempunyai nilai *tensile strength* sebesar 120 ksi, *Yield strength* sebesar 92 ksi, *Elongation* (%EL) sebesar 14%, *Reduction of Area* (%RA) sebesar 35 % dan mempunyai nilai kekerasan *Rockwell* antara 25-34 HRC pada bagian dalam dan maksimal 54 HRC pada bagian permukaan baut [5].

Pengujian komposisi kimia menggunakan *spectrometer* yang ada di Politeknik Manufaktur Ceper. Untuk pengujian metalografi, baut terlebih dahulu dilakukan pengamplasan supaya permukaan baut menjadi halus menggunakan amplas no 400, 600, 800,1000, 1500 dan 2000. Setelah proses pengamplasan selesai tahap berikutnya adalah pemolesan menggunakan mesin polis, kain beludru kemudian diberi sedikit *autosol*. Tahap selanjutnya pengetsaan, dimana proses ini memberikan efek pewarnaan pada butir dan batas butir. Cairan yang digunakan yaitu dengan mencampurkan 10 ml NH₄OH, 10 ml H₂O₂ dan 10 ml *aquades* aduk sampai rata. Kemudian celup spesimen menggunakan penjepit ke dalam gelas kimia tersebut selama 30 detik. Setelah itu bilas dengan air dan bersihkan menggunakan tisu.

Pengujian kekerasan dengan tujuan untuk mengetahui nilai kekerasan material, dengan membandingkan nilai kekerasan akhir dengan standar SAE J429 *Grade 5*. Pengujian kekerasan dilakukan dengan menggunakan mesin *Rockwell Hardness Tester type HR-150A*. Pengujian menggunakan skala pengujian HRC dengan beban mayor sebesar 150 kgf. Pengujian dilakukan pada daerah dekat patahan sampai 17 titik berjarak 3 mm.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini akan diuraikan data hasil pengamatan dan pengujian di laboratorium terhadap material baut *Gearbox*. Uraian ini meliputi kondisi kerja dari baut *Gearbox*, hasil pengamatan visual, pengujian komposisi, pengujian kekerasan dan pengujian mikrografi.

3.1 Data Lapangan

Baut berstandar SAE J429 *medium carbon grade 5* dengan diameter luar (d) = 25,4 mm, diameter efektif (d_1) = 23,338 mm, diameter inti (d_2) = 21,963 mm, torsi pengencangan baut (T) = 678 Nm. Baut mengalami kegagalan

setelah beroperasi selama 8 bulan, sedangkan standar pergantian baut setiap 12 bulan sekali. Gambar baut dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Baut dalam kondisi patah [1]

3.2 Analisa Tegangan

Tegangan yang di terima pada baut yang mengalami patah sebagai berikut [6] :

$$\tau_g = \frac{m.g}{\pi.d1.k.p.z} \quad (1)$$

Dimana :

- τ_g = tegangan geser (MPa)
- F = gaya (N/mm²)
- A = luasan (mm²)
- m = masa (kg)
- g = percepatan grafitasi (m/s²)
- d₁ = diameter inti (mm)
- k = konstanta ulir metris (0,84)
- p = jarak bagi ulir (mm)
- z = jumlah ulir

maka didapatkan :

$$\begin{aligned} \tau_g &= \frac{m.g}{\pi.d1.k.p.z} \\ &= \frac{32,67 \text{ Kg} \cdot 9,8 \text{ mm/s}^2}{3,14 \cdot 21,963 \text{ mm} \cdot 0,84 \cdot 3,1750 \text{ mm} \cdot 18} \\ &= \frac{320166 \text{ N}}{3310,677 \text{ mm}^2} \\ &= 96,71 \text{ N/mm}^2 \\ &= 96,71 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan geser maksimum material baut :

$$\tau_y = \frac{1}{2} \sigma_y \quad (2)$$

dimana nilai $\sigma_y = 640 \text{ Mpa}$, maka di substitusikan ke persamaan 2 :

$$\begin{aligned} \tau_y &= \frac{1}{2} \sigma_y \\ &= \frac{1}{2} \times 640 \text{ MPa} \\ &= 320 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Safety factor dapat dicari dengan menggunakan rumus :

$$SF = \frac{\tau_y}{\tau_g} \quad (3)$$

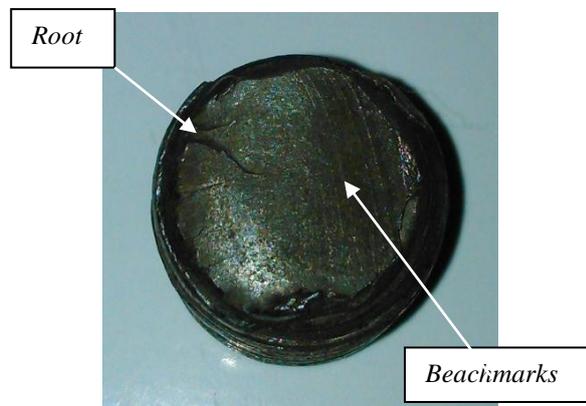
Maka didapatkan,

$$\begin{aligned}
 SF &= \frac{\tau_y}{\tau_g} \\
 &= \frac{320 \text{ MPa}}{91,71 \text{ MPa}} \\
 &= 3,489 \\
 &= 3,5
 \end{aligned}$$

Dari data perhitungan di atas di dapat bahwa nilai $\tau_g < \tau_y$. Maka dapat di simpulkan bahwa tegangan yang terjadi pada baut *gearbox* sesuai dengan rancangan dan tegangan yang terjadi dapat diizinkan dengan nilai *Safety factor* sebesar 3,5.

3.2 Pengamatan Visual

Pada gambar 10 menunjukkan kondisi baut yang mengalami kegagalan yang terhubung pada traksi motor. Pada gambar ini terlihat adanya *beachmark* dan *root*. *Beachmarks* adalah fitur unik yang ditemukan di banyak *fatigue fracture*, dan kehadiran mereka merupakan pertanda positif untuk mengidentifikasi *fatigue fracture*.



Gambar 10. Permukaan baut yang mengalami patah [1]

3.3 Pengujian Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia dari baut setelah mengalami kegagalan. Kemudian hasil pengujian akan di bandingkan dengan standar yang di keluarkan oleh *General Elektrik (GE)* yaitu SAE J429 *Grade 5*. Pada table 1 menampilkan hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan di laboratorium Logam Ceper, Politeknik Manufaktur Ceper.

Tabel 1. Hasil Pengujian Komposisi Kimia

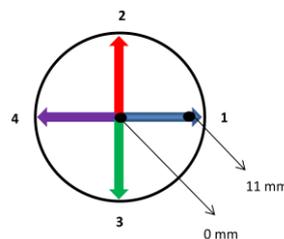
UNSUR	Sampel Uji, wt (%)	SAE J429 <i>Grade 5</i> , wt (%)
Fe	97,8	<i>Balance</i>
C	0,479	0,25 - 0,55
P	< 0,005	0,025 max
S	< 0,005 ⁴	0,025 max
Mn	0,731	-
Si	0,333	-
Cr	0,106	-
Mo	0,0476	-
Ni	0,0171	-
Al	0,0299	-
Co	0,0849	-
Cu	0,0102	-

Nb	0,0551	-
Ti	< 0,002	-
V	0,0184	-
W	0,210	-
Pb	< 0,010	-
Ca	0,0001	-
Zr	0,0133	-

Dari table 1 dapat diketahui bahwa baut yang mengalami patah memiliki komposisi kimia yang sesuai dengan standar SAE J429 *Grade 5* yang ditunjukkan dengan 4 unsur utama yaitu Fe, C, P, S. Jika dilihat dari komposisi kimia maka baut ini mempunyai nilai sifat mekanis yang hampir sama dengan SAE J429 *Grade 5*.

3.3 Pengujian Kekerasan

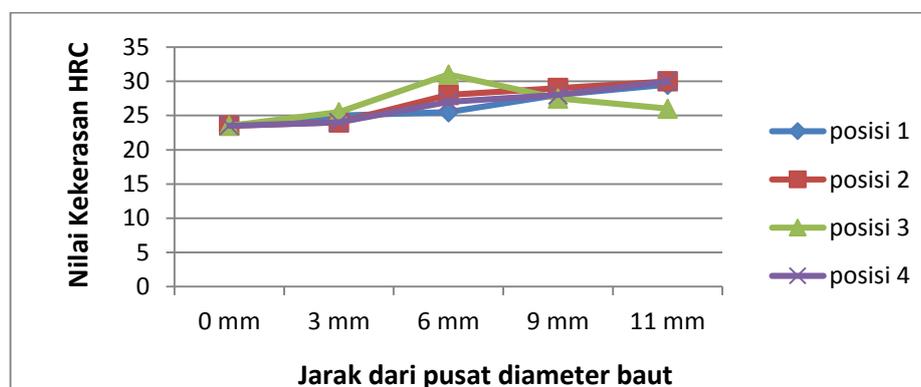
Pengujian kekerasan menggunakan mesin *Rockwel Hardness Tester type HR-150A* dengan metode Rockwell skala C dengan penetrator yang digunakan intan kerucut dengan beban mayor 150kg.



Gambar 11. Pembagian posisi pengujian kekerasan

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan

Jarak dari pusat diameter baut	nilai kekerasan					SAE J429
	posisi 1	posisi 2	posisi 3	posisi 4	rata-rata	
0 mm	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	Bagian dalam 25-34 HRC
3 mm	25	24	25.5	24	24.63	
6 mm	25.5	28	31	27	27.88	
9 mm	28	29	27.5	28	28.13	Bagian luar max 54 HRC
11 mm	29.5	30	26	30	28.88	



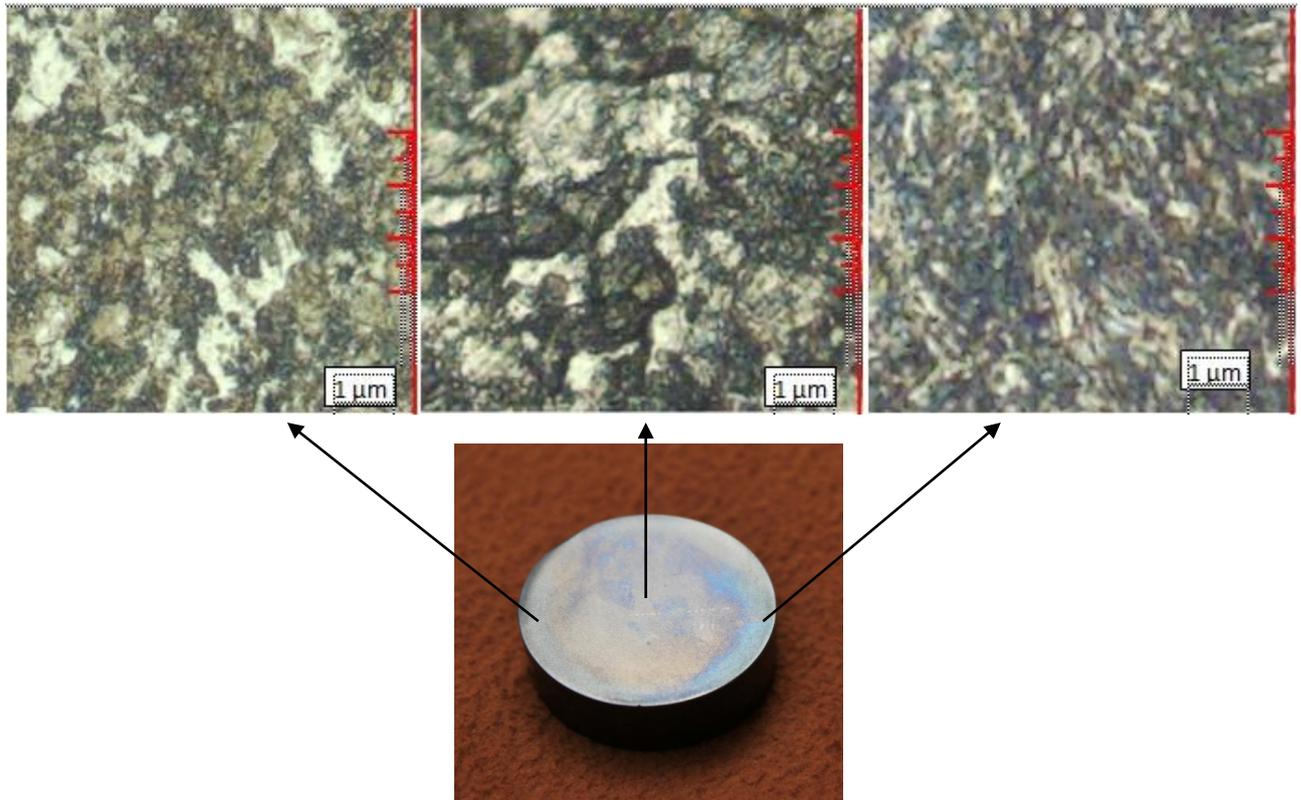
Gambar 12. Grafik hasil pengujian kekerasan

Dalam hasil pengujian kekerasan diketahui bahwa ada beberapa titik yang berbeda secara grafik. Pada grafik gambar 12 garis posisi 3 terlihat bahwa nilai kekerasan yang didapat berbeda dengan posisi 1, posisi 2, dan posisi 4. Pada posisi 3 nilai kekerasan paling tinggi berada pada 6 mm dari pusat lingkaran baut yaitu sebesar 31 HRC.

Sedangkan pada diameter luar memiliki nilai kekerasan sebesar 26 HRC. Keadaan ini bisa diakibatkan karena proses quench dan temper yang kurang sempurna atau tidak merata pada permukaan baut. Sehingga ada baut mempunyai kekerasan tidak merata.

3.4 Pengujian Metalografi

Untuk memperkuat data hasil pengujian kekerasan. Maka dilakukan pengujian metalografi yang bertujuan untuk melihat struktur mikro dari material baut. Pengujian dilakukan di Laboratorium Material Teknik Undip. Pengujian dilakukan menggunakan mikroskop *optic* dengan perbesaran 200x. Gambar hasil mikrografi dapat dilihat pada gambar 13 berikut. Pengujian strukturmikro menggunakan *Nital etching*.



Gambar 13. Struktur mikro baut dengan perbesaran 200x

Dari Gambar 13. menunjukkan proses *quench and temper* yang gagal sehingga fasa yang dihasilkan bukan *martensit* melainkan *ferrite* dan *pearlite*. Hal ini dibuktikan dari foto struktur mikro hasil pengujian laboratorium (Gambar 13) berbeda dengan foto struktur mikro dari jurnal yang berfasa *martensit* (Gambar 6). Serta uji kekerasan yang tidak sesuai dengan spesifikasi SAE J429 *grade 5*.

4. Kesimpulan

Dari data hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa mekanisme kegagalan baut *gearbox* diakibatkan karena beban yang berfluktuasi dibawah kekuatannya yaitu sebesar 97,61 MPa yang terjadi dalam waktu yang lama dan berulang-ulang sehingga menyebabkan patah lelah. Diperkuat dengan adanya *beachmark* yang tampak pada permukaan patahan. Material uji memiliki nilai kekerasan yang tidak sesuai dengan standar SAE J429. Sehingga mempercepat laju patahan. Hal ini diakibatkan karena proses *Quenched & Tempered* yang kurang sempurna.

5. Daftar Pustaka

- [1] Depo Lokomotif Stasiun Poncol, DAOP IV Semarang.
- [2] Shigley's, 2006, "*Mechanical Engineering Design 8th edition*", The McGraw-Hill, United States of America.
- [3] Donald J. Wulpi, 1999, "*Understanding How Components Fail 2th Edition*", ASM International, Materials Park, Ohio, USA
- [4] Sandro griza, Marcio Erick G. *The effect of bolt length in the fatigue strength of M24x3 bolt studs.*, Engineering Failure Analysis 34 (2013) 397-406
- [5] SAE International Surface vehicle standar. SAE J429 APR2013
- [6] Sularso, Kiyokatsu suga, 1980, Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, PT Pradnya Paramita, Jakarta.