

ANALISIS KEGAGALAN DRUM REM PRODUKSI UKM UNTUK TRUK/BUS DENGAN DAYA MESIN 190 HP

IGN Wiratmaja Puja, Rochim Suratman,
Agus Suprihanto, Reza, dan Henry Ako

Departemen Teknik Mesin ITB

Abstrak

Industri skala kecil dan menengah (UKM) di Indonesia saat ini sudah mampu memproduksi tromol rem truk/bus dengan harga yang relatif murah, namun kualitasnya masih perlu ditingkatkan. Kegagalan tromol produk UKM umumnya terjadi bentuk retak atau pecah sebelum umur teknisnya. Makalah ini menyajikan identifikasi kegagalan tromol rem produksi UKM, baik dari aspek material, aspek operasional pembebanan maupun aspek tegangan. Pengujian sifat-sifat mekanik dan fisik material dilakukan dengan uji tarik, uji kekerasan, uji komposisi kimia, dan metallografi. Fraktografi dilakukan untuk mempelajari jenis dan proses kegagalan yang terjadi. Beban pengereman dianalisis pada berbagai kondisi operasi seperti jalan lurus, membelok, dan menurun untuk berbagai nilai perlambatan. Analisis tegangan dilakukan dengan metoda elemen hingga. Hasil analisis menunjukkan bahwa material tromol produksi UKM belum cukup kuat menahan tegangan yang terjadi. Analisis tegangan juga menunjukkan bahwa bagian yang mengalami retak adalah pada daerah di mana terjadi tegangan relatif sangat tinggi.

Abstract

Indonesian small and medium industries (UKM) have the ability to produce relatively cheap truck/bus brake drums, but the quality is needed to be improved. The drums usually fail in form of cracks or fractures before the design life is reached. This paper presents failure identification of the UKM's brake drums that is including material aspects, operational loading, and stress analysis. The mechanical and physical properties of the materials are studied by conducting tensile test, hardness test, chemical composition, and metallography. Fractography is also conducted to study the type and process of the failures. The brake loads are analyzed for various operational conditions such as straight, curved, and downhill path, with various value of deceleration. Stress analysis of the drum due to the applied loads is conducted using finite element method. The complete analysis shows that the UKM's drums are not strong enough for the applied braking load. It is also observed that the crack locations are in agreement with the highly computed stressed areas.

Keywords: drum brake, failure, stress, grey cast iron, finite element method

1. PENDAHULUAN

Truk dan bus merupakan moda angkutan barang dan penumpang yang terpenting di Indonesia. Data BPS pada tahun 1999 menunjukkan bahwa jumlah truk/bus yang layak jalan mencapai 2,2 juta buah. Jumlah kendaraan ini diperkirakan mengalami peningkatan rata-rata 5,6% setiap tahun. Dengan demikian kebutuhan suku cadang bus/truk juga mengalami peningkatan. Suku cadang yang diperlukan terutama adalah untuk bagian atau komponen yang sering memerlukan penggantian. Salah satu komponen vital yang sering harus diganti adalah sepatu dan *drum brake* (tromol rem). Rem merupakan komponen penting dalam kendaraan karena menyangkut keamanan dan keselamatan berlalu lintas di jalan raya^[1,2]. Tromol rem yang terbuat dari besi cor harus diganti secara rutin jika keausan yang dialami telah mencapai batas yang diijinkan^[3].

Sebelum krisis ekonomi melanda Indonesia, sebagian besar pangsa pasar tromol rem ini dikuasai oleh produk impor dan produk lisensi. Usaha kecil dan menengah

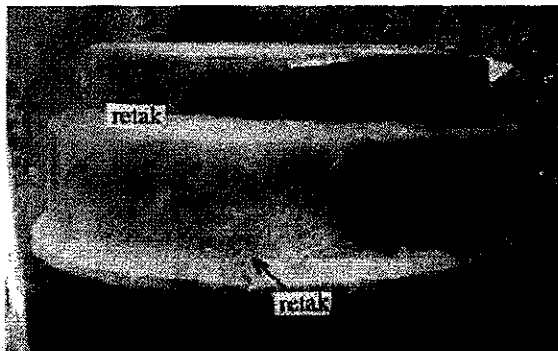
(UKM) sudah mampu memproduksi tromol rem, hanya saja masih terdapat kendala pada kualitas dan umur pemakaian yang rendah. Tromol rem produk UKM umumnya hanya mampu bertahan rata-rata tiga bulan untuk pemakaian normal^[4]. Sedangkan produksi impor mampu bertahan hingga satu tahun atau lebih pada pemakaian normal. Kegagalan tromol produk UKM umumnya karena retak atau pecah. Depresiasi Rupiah terhadap Dollar membuka peluang industri kecil untuk meningkatkan daya saing, dengan catatan bahwa kualitasnya perlu ditingkatkan. Untuk itu perlu dilakukan identifikasi dan analisis kegagalan serta upaya pengembangan lebih lanjut. Tromol rem impor atau produk lisensi dapat digunakan sebagai referensi.

Dalam makalah ini, identifikasi kegagalan tromol rem produksi UKM dilakukan dalam dua aspek utama yaitu aspek material dan tegangan. Dari segi aspek material dilakukan pengujian sifat-sifat mekanik dan sifat fisik material dengan uji tarik, uji kekerasan, metallografi, dan uji komposisi kimia. Identifikasi bentuk dan jenis retakan dilakukan untuk mengetahui jenis dan proses kegagalan yang terjadi. Pada aspek tegangan, analisis

dimulai dengan perhitungan beban pengereman untuk berbagai kondisi operasi kendaraan. Beban pada tromol rem dianalisis untuk jalan lurus, membelok, menanjak, dan menurun dengan berbagai nilai perlambatan. Analisis tegangan dilakukan dengan metoda elemen hingga. Kondisi batas model elemen hingga dibuat sedekat mungkin dengan kondisi riil drum rem saat terpasang. Hasil analisis tegangan selanjutnya di bandingkan dengan lokasi retakan sebenarnya terjadi. Beberapa hal yang tidak ikut dibahas dalam makalah ini adalah aspek tegangan thermal^[5], pengaruh suhu terhadap kekuatan material^[6], dan aspek ketahanan aus material^[7].

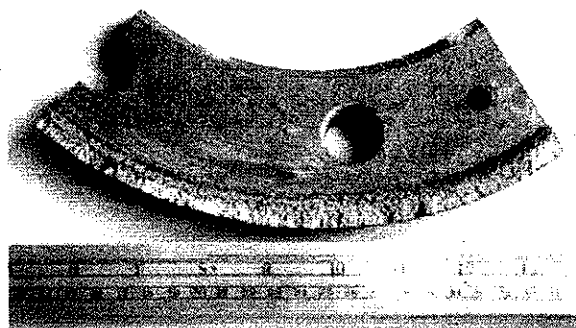
2. RETAK DAN PATAHAN TROMOL

Terdapat dua buah retak pada sampel yaitu pada bagian gesek dan bagian lekukan dekat dengan lubang baut seperti ditunjukkan pada gambar 1. Retak pada bagian lekukan dekat dengan lubang baut ini panjangnya sekitar 35 cm. Retak terdapat pada sisi dalam yang tembus sampai sisi luarnya.

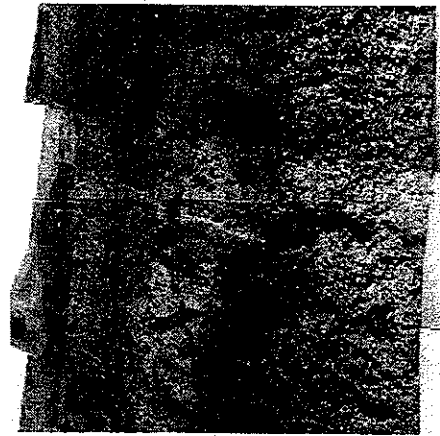


Gambar 1. Retak pada rem drum depan bus/truk produksi UKM

Dari pengamatan bentuk retakan dan permukaan ujung retak, ternyata tidak ditemukan adanya jejak patah lelah^[8]. Kemungkinan retak akibat temperatur tinggi tidak dapat diidentifikasi berhubung sampel sudah mengalami karat. Jejak perambatan retak juga teridentifikasi^[9]. Contoh penampang retakan ditampilkan pada gambar 2.



(a)



(b)

Gambar 2. Penampang retak tromol rem

Dengan tidak ditemukannya awal retak dan jejak perambatan retaknya, maka penyebab retak tidak dapat diketahui dengan jelas hanya dari observasi permukaan retak. Hal ini tentu saja akan menyulitkan tahap analisis selanjutnya. Padahal apabila jejak perambatan retak dan awal retaknya dapat ditemukan, maka dapat diketahui pula mekanisme terjadinya retak dan perambatannya^[9].

Pengamatan dengan SEM seperti diperlihatkan pada gambar 6 menunjukkan bahwa terdapat bagian berwarna gelap, terang dan kelabu. Bagian yang berwarna gelap tersebut adalah bagian yang letaknya lebih dalam dari bagian lainnya. Kemungkinan, bagian ini menunjukkan semacam lubang. Lubang ini mungkin merupakan bagian yang di tempati oleh grafit. Bagian kelabu yang di kelilingi oleh bagian yang terang seperti menunjukkan tanda-tanda adanya deformasi plastis. Kemungkinan bagian ini berasal dari butir-butir matriknya. Bagian yang berwarna terang tersebut terdapat di antara bagian-bagian yang berwarna kelabu. Bagian yang berwarna terang ini mungkin berasal dari fasa-fasa lain yang terdapat di antara matriknya.

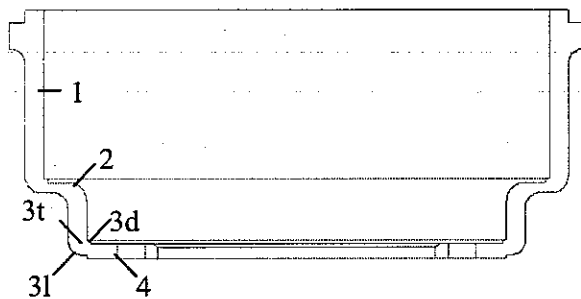
3. SIFAT MEKANIK DAN FISIK MATERIAL

Pada saat pengereman, tromol rem berfungsi sebagai komponen untuk mengubah energi kinetik kendaraan menjadi panas melalui mekanisme gesekan antara tromol dengan sepatu rem. Panas yang timbul selanjutnya dibuang ke lingkungan dan dialirkan ke komponen yang disambungkan ke drum. Memperhatikan hal tersebut, maka material yang digunakan untuk tromol rem haruslah memiliki sifat-sifat^[1,10] : (1) Konduktivitas panas yang baik, (2) Kekuatan yang mencukupi, (3) koefisien gesekan yang baik, (4) Ketahanan aus yang baik, (5) Modulus elastisitas yang rendah untuk mengakomodasi tegangan akibat termal, (6) Bebas dari fasa-fasa yang tidak stabil terhadap temperatur.

Untuk mengetahui kualitas material tromol produk UKM apakah dapat memenuhi kriteria di atas, maka perlu dilakukan pengujian mekanis dan juga pengujian

fisik material tromol. Analisis dalam makalah ini difokuskan pada kekuatan material menahan beban mekanis, dan tidak dibahas tentang ketahanan aus, konduktivitas thermal, tegangan thermal, dan perubahan kekuatan material sebagai fungsi dari temperatur. Aspek pengaruh thermal sangat penting untuk diteliti lebih lanjut karena pada saat beroperasi tromol rem akan mengalami temperatur yang tinggi [5,6,11]

Pengambilan spesimen dilakukan pada beberapa posisi yaitu bagian 1, 2, 3d, 3t, 3l dan 4 seperti ditunjukkan pada gambar 3. Pada beberapa kasus kegagalan yaitu retak yang ditemukan di lapangan berada pada posisi 3, sehingga pada posisi ini diambil tiga posisi yaitu 3d (bagian dalam), 3t (bagian tengah), 3l (bagian luar) untuk dianalisis lebih lanjut.



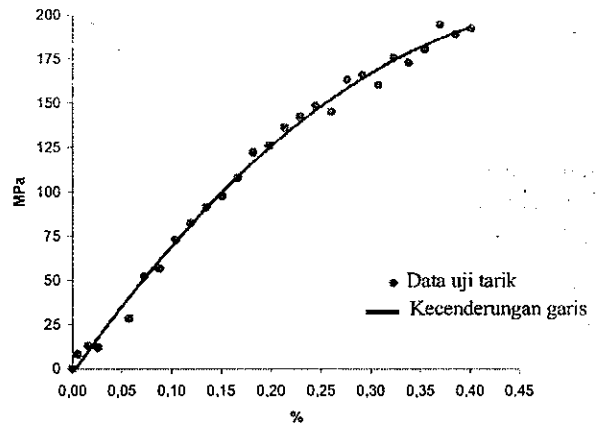
Gambar 3. Posisi pengambilan Sampel

3.1. Pengujian Sifat Mekanik

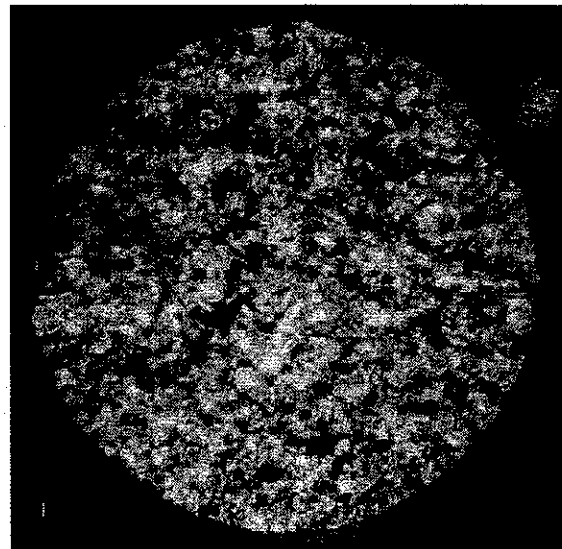
Pengujian sifat mekanik material dilakukan dengan pengujian tarik^[12], pengujian kekerasan Brinell dan pengujian kekerasan mikro fasa perlit. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa kekuatan tarik rata-rata adalah 201 MPa dan perpanjangan rata-rata sebesar 0,57%. Hasil pengujian kekuatan tarik dan perpanjangan ditunjukkan pada tabel 1 dan grafik salah satu spesimen uji tarik disajikan pada gambar 4.

Tabel 1. Hasil pengujian tarik ^[4]

Uji tarik	Kekuatan tarik (MPa)	Perpanjangan (%)
Spesimen # 1	196	0,50
Spesimen # 2	202	0,55
Spesimen # 3	204	0,65
Rata-rata	201	0,57



Gambar 4. Hasil pengujian tarik spesimen 1



Gambar 5. Permukaan patah spesimen uji tarik (15X)

Patahan spesimen uji tarik ini kemudian diamati dengan mikroskop stereo. Seperti halnya penampakan permukaan retaknya, pada patahan spesimen uji tarik ini terdapat bagian-bagian yang mengkilat. Photo penampang patahan spesimen uji tarik ditampilkan pada gambar 5.

Pengujian kekerasan material dilakukan dengan alat uji Brinell. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekerasan rata-ratanya adalah 192 HB. Data uji keras untuk tiap bagian disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian kekerasan

Spesimen	Pengukuran Kekerasan (HB) ke					Rata-rata (HB)
	1	2	3	4	5	
Posisi 1	190	190	189	196	193	192
Posisi 2	196	192	192	196	198	195
Posisi 3	195	190	193	189	192	192
Posisi 4	189	190	189	190	192	190

3.2. Komposisi Kimia

Pengujian komposisi kimia dilakukan dengan EDS pada permukaan retak spesimen. Bagian yang diuji adalah pada bagian yang berwarna terang dan kelabu. Salah satu contoh hasil SEM permukaan retak serta contoh hasil EDS disajikan pada gambar 6 dan tabel 3.



Gambar 6. Permukaan retak dengan SEM (200X)

Hasil analisis menunjukkan selain terdapat unsur-unsur yang lazim terdapat pada besi cor untuk rem^[13], pada bagian tersebut terdapat pula unsur O dalam jumlah yang berbeda. Pada bagian yang terang ini kadar O lebih rendah dibandingkan dengan bagian yang berwarna kelabu. Komposisi kimia pada bagian kelabu yang dekat dengan bagian yang gelap menunjukkan kadar C yang lebih tinggi. Hasil pengujian komposisi kimia yang dilakukan secara *bulk* menunjukkan karbon ekuivalennya di bawah komposisi eutektik, sehingga besi cor tersebut tergolong besi cor hipoetektik.

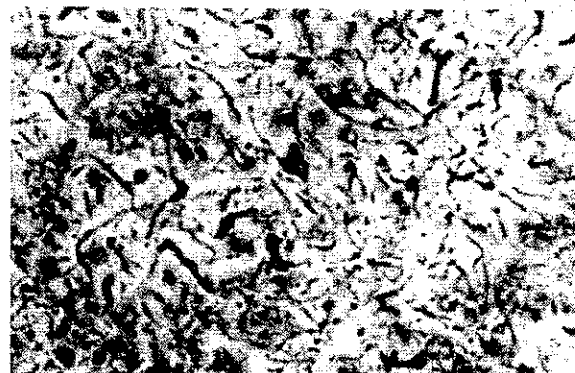
Tabel 3. Komposisi Kimia material pada Posisi A dan Posisi B

Unsur	Posisi A		Posisi B	
	Wt %	At %	Wt %	At %
Fe	81,8	52,98	96,5	91,59
C	12,09	36,31	1,26	5,57
Si	0,52	0,67	0	0
Mn	1,86	1,23	1,79	1,73
S	0,38	0,43	0	0
P	0,04	0,04	0	0
O	3,37	7,66	0,26	10,86
Ca	0,28	0,25	0,17	0,22

4. METALLOGRAPHY DAN KEKERASAN FASA PERLIT

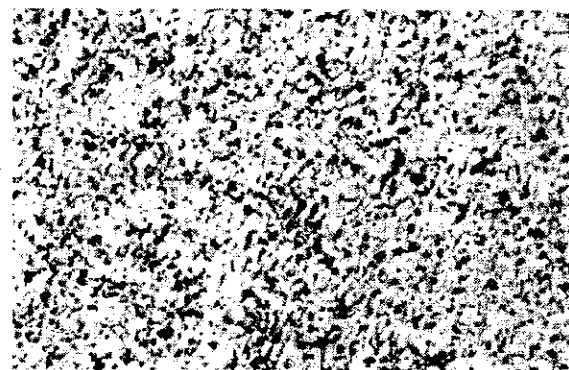
Hasil pengujian metalografi pada spesimen *as-polished* menunjukkan bahwa bentuk grafit yang ditemukan pada bagian 1, 3d, 3t, 3l dan 4 berbentuk grafit serpih dengan distribusi A dan B. Pada bagian 1, grafit serpih distribusi B yang ditemukan tidak berjumlah banyak, sedangkan pada bagian 3d, 3t, 3l dan 4 distribusi grafit

A dan B ditemukan dalam jumlah yang hampir sama banyak. Bentuk grafit yang ditemukan pada bagian 2 adalah grafit serpih dengan distribusi D. Contoh struktur mikro dengan pembesaran 100 x untuk beberapa posisi pengambilan spesimen seperti ditunjukkan pada gambar 3, ditampilkan pada gambar 7-10.

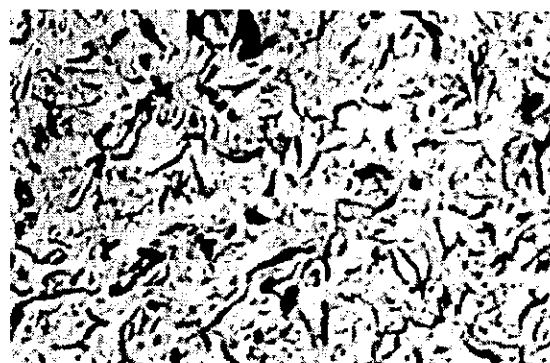


Gambar 7. Bentuk grafit bagian 1 (100X)

Dari pengukuran didapatkan bahwa ukuran grafit pada bagian 1, 3d, 3t, 3l dan 4 adalah antara 3-5. Ukuran tersebut ekuivalen dengan panjang grafit 0,08mm – 0,32 mm.



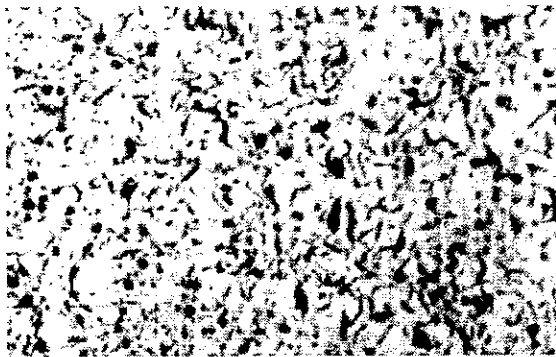
Gambar 8. Bentuk grafit pada bagian 2 (100x)



Gambar 9. Bentuk grafit bagian 3d (100x)

Bentuk grafit serpih distribusi B dan D lazim ditemukan pada bagian coran yang tipis atau dapat terbentuk pula karena proses inoculasi yang kurang sempurna. Laju pendinginan yang menghasilkan

distribusi grafit D ini lebih cepat dari pada laju pendinginan yang menghasilkan distribusi grafit B. Hal ini terlihat dari tebal coran bagian 2 yang hanya 8 mm dibandingkan dengan bagian 3 dan 4 yang mempunyai tebal 12 mm dan 15 mm.



Gambar 10. Bentuk Grafit Bagian 4/ 100x)

Observasi struktur mikro spesimen yang dietsa dengan nital 5% menunjukkan bahwa terdapat struktur gelap-terang berselang-seling yang merupakan ciri khas perlit. Struktur berwarna putih/terang mungkin berupa fasa ferit atau sementit^[14]. Pada pembesaran yang lebih tinggi pada beberapa bagian yang berwarna terang terlihat adanya bintik-bintik yang tersebar di dalamnya. Struktur ini ciri merupakan ciri khas struktur steadit.

Untuk mengetahui apakah struktur yang berwarna terang tersebut ferit atau sementit dilakukan pengujian kekerasan-mikro. Metode yang digunakan adalah metode Vickers dengan beban 200gr. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa struktur tersebut lebih keras daripada perlit. Oleh karena itu struktur tersebut bukan ferit karena kekerasan ferit lebih rendah daripada kekerasan perlit. Hasil pengukuran kekerasan mikro matrik pada struktur-mikro untuk tiap bagian ditunjukkan pada tabel 4 dan 5.

Tabel 4. kekerasan mikro fasa perlit

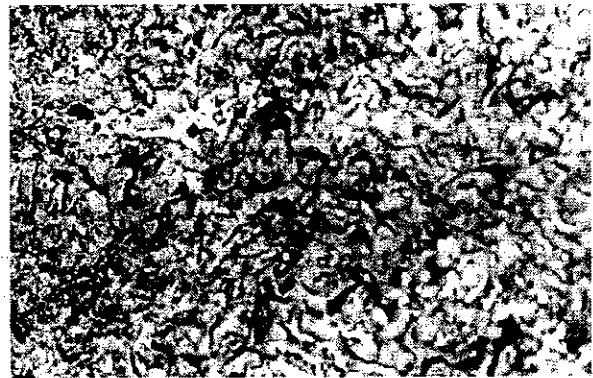
Spesimen	Pengukuran Kekerasan (VHN) ke				Rata-rata (VHN)
	1	2	3	4	
Bagian #1	285	270	270	302	282
Bagian #2	302	302	285	302	298
Bagian #3	302	285	302	270	290
Bagian #4	302	302	285	302	298

Tabel 5. Kekerasan mikro fasa terang/putih

Spesimen	Pengukuran Kekerasan (VHN) ke				Rata-rata (VHN)
	1	2	3	4	
Bagian #1	548	526	526	526	531
Bagian #2	548	526	548	548	542
Bagian #3	526	548	526	526	531
Bagian #4	526	548	526	526	531

Hasil pengujian metalografi dan kekerasan-mikro menunjukkan struktur-mikro besi cor rem drum ini mempunyai matrik perlit dan memiliki bentuk grafit serpih serta terdapat pula sementit dan steadit. Contoh struktur mikro pada bagian 3 setelah dietsa dengan etsa nital 5% ditampilkan pada gambar 11.

Pengukuran persentase matrik dilakukan dengan metode *point counting*, dan hasilnya disajikan pada tabel 6. Pengukuran persentase fasa sementit dan steadit digabung menjadi satu.



Gambar 11. Struktur Mikro Bagian 3 Dalam (100X, etsa Nital 5%)

Tabel 6. Prosentase matrik

Posisi	Tebal (mm)	Matrik (%)		Grafit Serpih (VII)	
		Perlit	Sementit	Distribusi	Ukuran
1	15	85,4	6,2	A, B	3
2	8	88,1	8,1	D	6
3d	12	85,3	7,8	A, B	3
3t		88,6	8,7	A, B	3
3l		85,2	9,8	A, B	4
4	15	86,1	8,2	A, B	3

5. IDENTIFIKASI KEGAGALAN MATERIAL

Mengacu pada diagram Maurer dan Greiner-Klingenstein^[10], untuk besi cor kelabu dengan kandungan unsur utama seperti dicantumkan pada tabel 3, seharusnya struktur-mikro besi cor drum rem ini mempunyai matrik perlit. Kenyataannya struktur mikro besi cor rem drum ini memiliki matrik perlit, sementit dan steadit. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh laju pendinginan atau perbedaan unsur-unsur paduan.

Steadit kemungkinan besar terbentuk karena unsur P yang berlebihan. Sementara sementit dapat terjadi karena adanya unsur paduan yang berfungsi meningkatkan pembentukan karbida (*carbide-promoteur*) seperti Cr, W, dan V^[21]. Unsur-unsur ini mungkin berasal dari skrap baja yang digunakan sebagai campuran bahan baku pengecoran.

Terbentuknya sementit dipengaruhi pula oleh laju pendinginan yang cepat terutama pada bagian coran yang tipis. Terdapatnya sementit dalam jumlah yang tinggi pada bagian lekukan menyebabkan kekerasannya tinggi demikian halnya dengan kekuatan tariknya. Sayangnya sementit yang keras tersebut cenderung getas. Struktur sementit pada bagian ini berada di antara butir-butir matriknya. Apabila terdapat retak, akan mudah menjalar.

Struktur lainnya yang dapat melemahkan besi cor adalah besi-sulfida (FeS). Struktur ini bersifat keras dan terdapat pada batas butir. Keberadaan FeS ini dipengaruhi oleh unsur Mn. Unsur S ini akan cenderung berikatan dengan Mn dari pada dengan Fe yaitu dengan membentuk MnS. Kadar Mn yang diperlukan untuk mengikat S menjadi MnS adalah $1,7(\%S) + 0,15$ [37].

Analisis struktur mikro untuk semua sampel menunjukkan, bahwa bentuk grafit yang kasar dan penyebaran yang kurang uniform. Struktur mikro pada bagian yang retak memiliki matrik perlit dengan grafit tipe VII distribusi A dan B dan ukuran grafit 4 dan sementit bebas antara 7,8 – 9,8%. Distribusi grafit B yang terdapat dalam jumlah yang besar pada bagian lekukan menunjukkan ukuran sel ektetik yang terbentuk adalah kasar. Sel ektetik yang kasar ini akan menurunkan ketangguhan retak besi cor [40].

Standar ASTM A159 dan SAE J431 mensyaratkan material besi cor kelabu *heavy duty brake drum* adalah grade G3500. Besi cor ini mempunyai komposisi kimia 3,4% TC(min), 1,3%–1,8% Si, 0,6%–0,9% Mn, 0,08% P dan 0,12% S. Dengan komposisi kimia tersebut, besi cor tersebut memiliki harga CE berkisar antara 3,85–3,99%. Kekuatan tarik minimumnya adalah 240 MPa dan kekerasannya 207–255 HB, *transverse load* minimal 1090 kg dengan defleksi minimalnya 6,1 mm. Struktur-mikronya dengan matrik perlit, bentuk grafit tipe VII distribusi A, dan ukuran grafitnya 3–5 dan ferrit atau sementit bebas tidak boleh melebihi 5% [10]. Dengan merujuk standar tersebut, sifat mekanik dan struktur mikro besi cor rem drum lokal ini tidak memenuhi persyaratan.

Kemungkinan adanya tegangan sisa pada bagian lekukan juga sangat berpengaruh terhadap kemampuan bagian tersebut menanggung tegangan yang terjadi. Tegangan sisa yang terjadi, terutama pada bagian sebelah dalam lekukan adalah tarik, sementara pada bagian tersebut bekerja tegangan tarik. Dengan demikian tegangan sisa yang terjadi termasuk yang merugikan.

Dari fraktografi patahan, awal retak tidak teridentifikasi dengan jelas serta tidak ditemui adanya jejak perambatan retak maupun jejak patah lelah. Bentuk permukaan patahan menunjukkan kemungkinan penyebab patahan adalah karena overload.

6. ANALISIS BEBAN Pengereman

Analisis Beban pengereman dilakukan dengan menggunakan mekanika kendaraan, yaitu menentukan gaya-gaya dan momen pada saat kendaraan direm. Dengan menggunakan prinsip keseimbangan dinamis, selanjutnya dapat diperoleh besar gaya pengereman dan torsi pengereman. Torsi dan gaya pengereman adalah merupakan data masukan untuk perhitungan distribusi tekanan pada sepatu dan drum rem.

Beban-beban utama yang bekerja pada kendaraan adalah berat kendaraan sendiri, berat barang atau penumpang yang diangkut, dan beban-beban inersia yang tergantung pada kondisi operasi kendaraan. Beban-beban tambahan yang terjadi saat kendaraan beroperasi antara lain adalah:

1. *Road rolling resistant* (R_r), tergantung pada beberapa parameter yaitu kerja yang dilakukan akibat deformasi ban, masuknya roda ke dalam tanah atau deformasi tanah, dan gesekan karena udara yang dikompresi ke dalam ban. Beban *road rolling resistant* ini dihitung dengan persamaan [15]

$$R_r = C_r \cdot W \quad (1)$$

dengan C_r adalah *rolling resistant coefficient*, untuk jenis jalan keras, $C_r = 0,0125$ [15]; W adalah beban yang ditanggung oleh ban (N)

2. *Air resistant* (R_a), disebabkan oleh *Pressure drag* yang merupakan fungsi bentuk kendaraan, gesekan pada permukaan kendaraan, gesekan karena udara yang masuk dan keluar kendaraan. Beban air resistant dihitung dengan persamaan [15]

$$R_a = \frac{\rho \cdot C_a \cdot A \cdot V_r^2}{2} \quad (2)$$

dimana ρ adalah massa jenis udara; A adalah luas proyeksi kendaraan; V_r adalah kecepatan relatif; dan C_a adalah konstanta hambatan udara. Untuk kendaraan jenis truk atau bus, $C_a \approx 0,7$ [15]

3. Perlawanan tahanan timbul pada saat kendaraan melewati tahanan dan besarnya sebanding dengan sudut tahanan (θ). Beban perlawanan tahanan dapat dihitung dengan persamaan mekanika

$$R_g = W \cdot \sin \theta \quad (3)$$

Pada kondisi kendaraan bergerak di jalan datar sambil melakukan pengereman, akan bekerja beban-beban utama dan beban inersia akibat kendaraan mengalami perlambatan. Arah gaya inersia perlambatan berlawanan dengan arah perlambatan kendaraan dan letaknya berada pada titik berat kendaraan. Besar perlambatan maksimum yang diijinkan adalah sebesar $0,5g$ [16]. Diagram benda bebas kendaraan truk pada jalan datar sambil mengerem ditunjukkan pada gambar 12. Dengan menggunakan prinsip keseimbangan dinamis maka dapat diturunkan bahwa gaya-gaya

reaksi pada roda depan dan roda belakang adalah

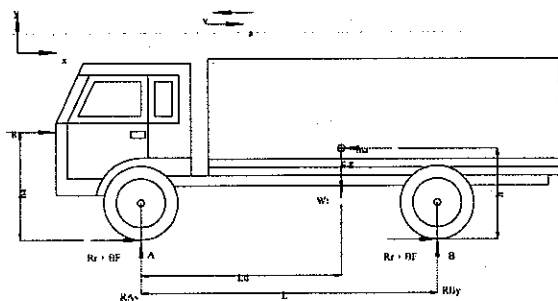
$$RB_y = \frac{Wt \cdot L_d + Ra \cdot h_a - m \cdot a \cdot h}{L} \quad (4)$$

$$RA_y = Wt - RB_y \quad (5)$$

dan koefisien traksi pengereman

$$\mu = \frac{ma - Ra - Rr_A - Rr_B}{Wt} \quad (6)$$

dengan m adalah massa kendaraan termasuk muatan, dan a adalah perlambatan yang timbul akibat kendaraan direm. Besar koefisien traksi pengereman (μ) harus selalu di bawah koefisien gesek antara roda dengan jalan (μ_{max}). Jika koefisien traksi pengereman sama dengan koefisien gesek antara roda dengan jalan maka pada roda akan terjadi peristiwa 'lock up', yaitu roda tidak akan menggelinding melainkan mengunci atau tidak berputar namun kendaraan terus bergerak.



Gambar 12. Diagram benda bebas kendaraan pada jalan datar sambil mengerem

Dari hasil analisis di atas, selanjutnya dapat ditentukan beban yang bekerja pada sistem rem. Contoh diagram benda bebas ban dan rem drum bagian depan ditunjukkan pada gambar 13. Dengan menggunakan prinsip keseimbangan didapatkan,

$$RC_y = RA_y \quad (7)$$

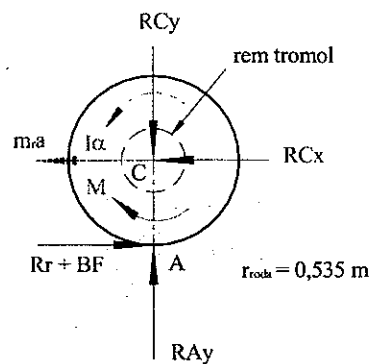
$$RC_x = R_r + BF_A - m_r \cdot a \quad (8)$$

$$M = (\gamma m_r \cdot a + RC_x) r_{roda} \quad (9)$$

Konstanta γ adalah konstanta faktor koreksi untuk benda-benda yang berputar. Benda-benda yang berputar antara lain poros roda, roda dan rem drum. Untuk kendaraan truk/bus, nilai γ adalah 1,06 pada kondisi *high gear*^[16]. Dari diagram benda bebas diperoleh resultan gaya gesek dan resultan gaya tekan pada drum sebagai berikut :

$$F_{gesek} = \frac{M_1}{r_{tromol}} \quad (10)$$

$$N = \frac{F_{gesek}}{\mu_1} \quad (11)$$



Gambar 13. Diagram benda bebas ban depan

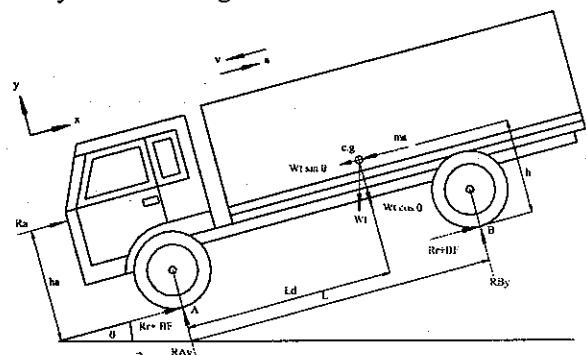
dengan μ_1 adalah koefisien gesek antara rem drum dengan sepatu rem = 0,38^[11] dan r_{tromol} adalah radius lingkaran permukaan gesek tromol. Untuk roda dan rem drum bagian belakang, perhitungan yang dilakukan sama dengan perhitungan roda dan rem drum bagian depan namun besaran RA_y diganti dengan RB_y .

Kondisi beban pengereman yang ekstrim akan terjadi pada saat kendaraan melewati turunan dengan sudut kemiringan θ . Pada saat kendaraan melaju dengan kecepatan tertentu dilakukan pengereman sehingga timbul perlambatan. Akibat adanya perlambatan, timbul gaya inersia perlambatan. Arah gaya inersia perlambatan berlawanan dengan arah perlambatan dan letaknya berada pada titik berat kendaraan. DBB kondisi menurun ditunjukkan pada gambar 14.

Dengan prinsip kesetimbangan, reaksi pada roda truk dan koefisien traksi pengereman dapat diturunkan sebagai berikut

$$\mu = \frac{Wt \cdot \sin \theta + ma - Ra - Rr_A - Rr_B}{Wt \cdot \cos \theta} \quad (12)$$

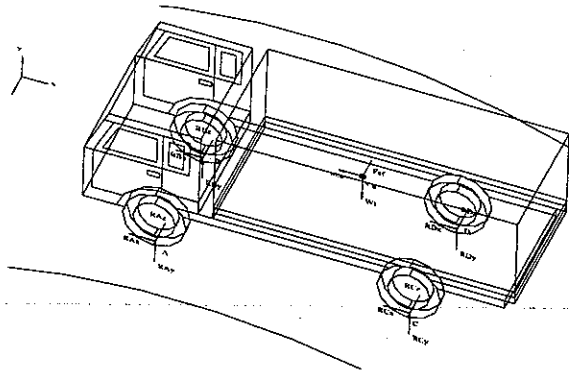
Analisis beban pengereman pada saat kendaraan melalui belokan juga perlu dipertimbangkan karena adanya efek sentrifugal.



Gambar 14. Diagram benda bebas kendaraan pada kondisi menurun dengan perlambatan

Pada saat pengereman, selain gaya inersia perlambatan, akan timbul pula gaya sentrifugal akibat gerakan kendaraan yang melalui jalan yang berbelok. Akibat

adanya dua buah gaya tersebut, roda depan bagian kiri dan roda depan bagian kanan tidak akan memperoleh gaya reaksi yang sama. Begitu pun untuk roda belakang bagian kiri dengan roda belakang bagian kanan. Ilustrasi gaya-gaya yang bekerja pada saat kendaraan melalui belokan sambil mengerem ditunjukkan pada gambar 15. Perhitungan dapat dilakukan secara dua dimensi, yaitu dengan memandang kendaraan dari bagian depan atau belakang (bidang y-z).



Gambar 15. Diagram benda bebas kendaraan membelok dengan perlambatan

Dari kesetimbangan didapat reaksi pada bagian kanan dan kiri kendaraan,

$$N_{ka} = \frac{F_{sf} \cdot h + W_t \cdot \frac{1}{2}L}{L} \quad (13)$$

$$N_{ki} = W_t - N_{ka} \quad (14)$$

Gaya sentrifugal F_{sf} dapat diperoleh dari persamaan^[15],

$$F_{sf} = \frac{m \cdot v^2}{R} \quad (15)$$

dimana, m adalah massa total kendaraan, v adalah kecepatan tangensial kendaraan, dan R adalah jari-jari kelengkungan jalan. Untuk jalan raya, R ditentukan dari persamaan^[20]

$$R = \frac{v^2}{127(e_{\max} + f_{\max})} \quad (16)$$

dengan $f = -0,00065 \cdot v + 0,192$, v adalah kecepatan tangensial kendaraan, e adalah superelevasi yang bernilai 0,08 s/d 0,1, dan f adalah koefisien gesek melintang. Setelah harga N_{ki} dan N_{ka} diketahui, dihitung gaya reaksi pada masing-masing roda dengan menggunakan perbandingan distribusi beban dinamik pada jalan datar. Dengan demikian akan diperoleh empat buah gaya reaksi pada keempat roda kendaraan. Untuk perhitungan numerik, disini digunakan data truk dengan kelas daya mesin 190 HP. Data-data diperlukan untuk analisis adalah sebagai berikut^[17]:

- Massa kendaraan total (m) = 14200 kg Kecepatan maksimum (v) = 101 km/jam
- Radius putar ban = 7300 mm
- Tenaga maksimum = 190 HP/2900 rpm
- Tipe mesin = Diesel 4 langkah, 6 silinder, tegak, segaris, pendingin air
- Sistem pembakaran = injeksi langsung
- Isi silinder = 7412 cc
- Dimensi kendaraan setelah berat kendaraan dan berat muatan disubstitusikan dengan sebuah berat total:
 $h_a = 1550$ mm; $L_d = 2878,78$ mm;
 $L = 4280$ mm; $h = 1486$ mm
- Ukuran sepatu rem :
lebar sepatu rem (b) = 102 mm
tebal sepatu rem (t) = 15 mm
panjang sepatu rem (p) = 432,8 mm

Untuk memperoleh gaya tekan terbesar pada drum rem, selanjutnya dilakukan perhitungan gaya-gaya dengan memvariasikan parameter kecepatan, perlambatan dan sudut kemiringan jalan. Contoh hasil perhitungan numerik beban pengereman pada roda depan untuk kecepatan truk 50 km/jam dicantumkan pada tabel 7.

Tabel 7. Beban Pengereman untuk berbagai sudut kemiringan jalan dan perlambatan ($v = 50$ km/jam)

θ (°)	a (m/s ²)	RA_v (N)	RB_v (N)	μ	Roda depan	
					F_{ges} (N)	N (N)
0	2,94	59997,9	79304,1	0,28	11878,8	31260,0
0	3,92	64834,4	74467,6	0,38	17181,1	45213,5
10	2,94	67703,6	69482,1	0,46	21591,3	56819,3
10	3,92	72540,1	64645,6	0,57	28069,0	73865,7
20	0,98	64116,4	66784,7	0,45	19967,6	52546,4
20	1,96	68952,9	61948,2	0,56	26391,9	69452,5
30	0,98	68397,4	52241,6	0,68	31464,7	82801,9

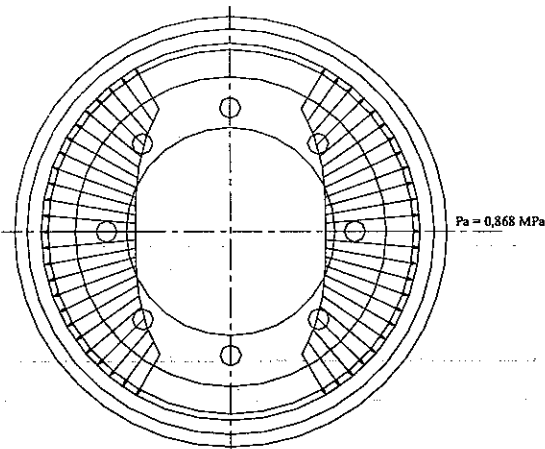
7. DISTRIBUSI TEKANAN PADA TROMOL REM

Setelah dilakukan perhitungan gaya tekan dan gaya gesek untuk berbagai kondisi operasi, maka perlu dilakukan perhitungan tekanan maksimum pada drum. Setelah harga tekanan maksimum diperoleh, didapat distribusi tekanan sepatu dan drum pada sistem rem. Huang^[18], telah menganalisis distribusi tekanan pada rem drum secara detail. Tetapi dengan pertimbangan praktis, di sini distribusi tekanan dianggap memiliki nilai yang sebanding dengan jarak vertikal dari pin pada sepatu rem sesuai dengan metoda Juvinal^[19]. Dengan demikian distribusi tekanan pada permukaan drum adalah sebagai berikut,

$$P(\phi) = \frac{\sin \phi}{\sin \phi_{\max}} \cdot P_{\max} \quad (17)$$

dengan sudut ϕ diukur dari garis yang menghubungkan

titik pusat drum ke posisi pin sepatu rem. Contoh distribusi tekanan yang bekerja pada tromol rem untuk kecepatan kendaraan 50 km/jam di jalan datar yang direm dengan perlambatan 0,3g ditampilkan pada gambar 16 dan tabel 8.



Gambar 16. Pola distribusi tekanan pada drum.

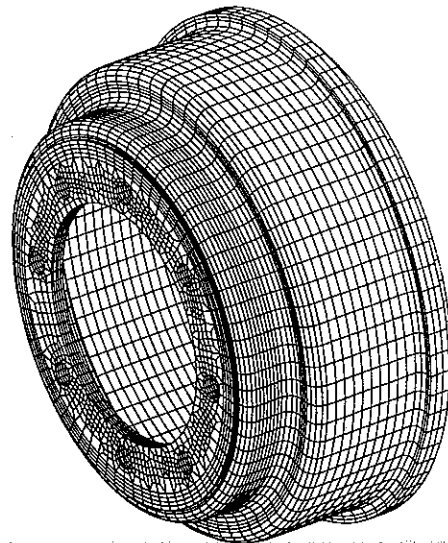
Tabel 8 Distribusi tekanan pada rem drum^[17]
($v = 50$ km/jam; $a = 0,3g$)

sudut ϕ ($^{\circ}$)	Tekanan (Pa)	sudut ϕ ($^{\circ}$)	Tekanan (Pa)
32,5	466376,1	92,5	867173,9
42,5	586412,3	102,5	847424,9
52,5	688630,7	112,5	801927,4
62,5	769925,4	122,5	732063,8
72,5	827826,3	132,5	639956,7
82,5	860574,1	142,5	528404,9

8. ANALISIS TEGANGAN DENGAN MEH

Tegangan yang terjadi pada drum akibat beban-beban yang bekerja dianalisis dengan menggunakan metoda elemen hingga (MEH). Pembuatan model elemen hingga dimulai dengan memodelkan geometri drum, penentuan jenis elemen, material, dan dilanjutkan dengan penentuan kondisi batas. Langkah selanjutnya adalah pemberian beban berupa tekanan dan gesekan pada bagian yang bersentuhan langsung dengan sepatu rem.

Dalam pemodelan drum rem, elemen yang digunakan adalah elemen solid *hexahedral*, yaitu elemen yang dibentuk oleh delapan buah nodal sehingga berbentuk balok. Model drum yang lengkap terdiri dari 16507 buah elemen dan 20946 buah nodal. Model elemen hingga tromol ditunjukkan pada gambar 17.



Gambar 17. Model elemen hingga drum rem

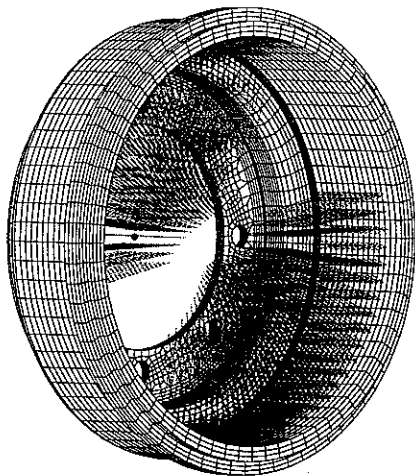
Kondisi batas model tromol adalah tumpuan jepit (*fixed constraint*) pada nodal-nodal yang terletak pada sisi luar rem drum. Hal ini disebabkan karena bagian ini dibaut sehingga menyatu dengan *velg* roda. Akibatnya *velg* roda menahan gerak dari rem drum. Dengan demikian tidak ada gerakan translasi maupun gerakan rotasi pada bagian ini.

Pembebanan yang aplikasikan pada model rem drum ini terdiri dari dua macam, yaitu:

1. *Elemental load*, yaitu beban yang diberikan pada elemen berupa tekanan
2. *Nodal load*, yaitu beban yang diberikan pada nodal berupa gaya gesek

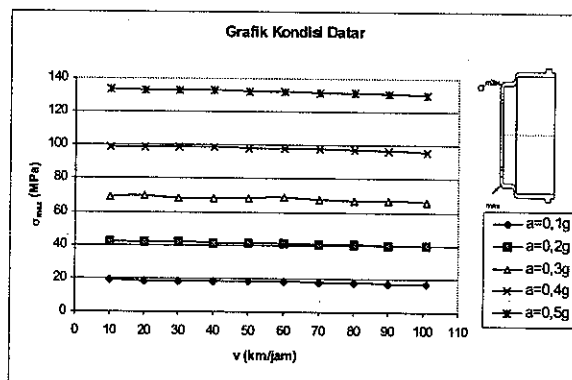
Beban tekanan yang diberikan merupakan hasil dari perhitungan pada bagian 6, berupa tekanan yang terdistribusi. Tekanan ini mengenai pada salah satu permukaan dari elemen *hexahedral* bagian yang berkontak langsung dengan sepatu rem. Sedangkan beban gaya gesek pada model rem drum diberikan sesuai dengan arah tangensial dari bagian rem drum yang melingkar.

Distribusi tekanan dan distribusi gaya gesek yang terjadi dikombinasikan sehingga model rem drum mengalami dua jenis beban yang berbeda yaitu beban tekanan dan beban gaya gesek, sesuai dengan keadaan yang sebenarnya. Ilustrasi untuk aplikasi beban normal pada tromol ditunjukkan pada gambar 18.



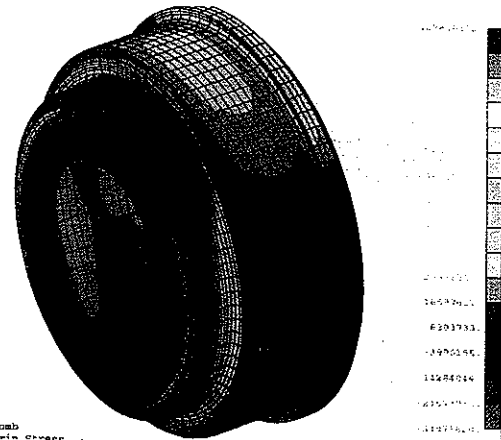
Gambar 18. Aplikasi tekanan pada model elemen hingga

Perhitungan tegangan dilakukan dengan memvariasikan kecepatan dan perlambatan yang terjadi pada truk untuk tiga kondisi operasi yaitu jalan datar, menurun dan berbelok. Kecepatan yang diambil adalah kecepatan 10, 20, 30, hingga 101 km/jam dan perlambatan yang bervariasi dari 0,1g, 0,2g, 0,3g, 0,4g sampai 0,5g. Gambar 19 memperlihatkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi tidak dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan saat di rem tetapi sangat dipengaruhi oleh nilai perlambatan.

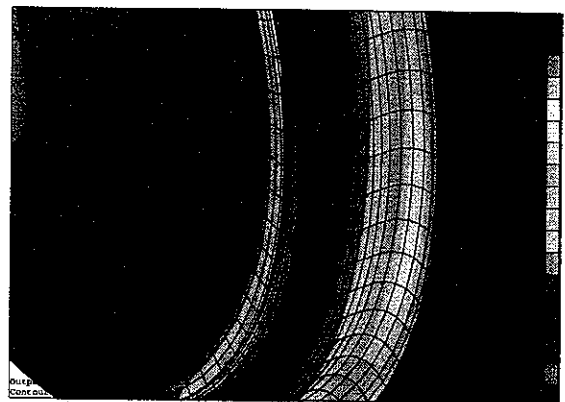


Gambar 19. Grafik tegangan maksimum terhadap variasi kecepatan dan perlambatan pada kondisi jalan datar.

Gambar 20 menunjukkan kontur tegangan normal yang terjadi pada tromol yang mendapat beban pengereman pada jalan datar dengan perlambatan 0,5g. Nilai numerik tegangan normal maksimum adalah sebesar 129,83 MPa pada elemen yang ber-ID 10538. Terlihat bahwa daerah yang mengalami tegangan relatif tinggi terletak pada bagian lengkung. Hasil analisis untuk jalan menurun dan berbelok menunjukkan pola distribusi tegangan yang serupa.



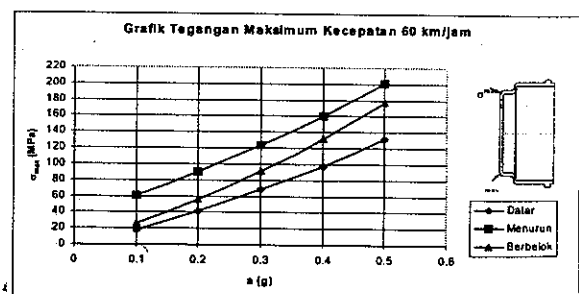
a=0,5g komb
14 Max Brin Gmax



Gambar 20. Distribusi tegangan pada tromol rem

Pengaruh perlambatan terhadap tegangan maksimum yang terjadi, pada kondisi jalan datar, membelok dan menurun, ditunjukkan pada gambar 21. Pada grafik ini kecepatan yang digunakan adalah kecepatan rata-rata kendaraan beroperasi, yaitu kecepatan 60 km/jam.

Untuk perbandingan, pada perlambatan 0,5g terlihat bahwa harga tegangan maksimum terbesar adalah kondisi menurun, yaitu sebesar 201,1 MPa, diikuti dengan kondisi berbelok, sebesar 177,2 MPa. Sedangkan tegangan terkecil terjadi pada kondisi datar, yaitu sebesar 132,1 MPa.



Gambar 21. Grafik tegangan maksimum terhadap perlambatan untuk operasi di jalan datar, belok dan menurun.

Analisis kekuatan struktur tromol menahan beban pengereman mengacu pada kriteria teori tegangan normal maksimum (TTNM). Hal ini sesuai untuk

bahan tromol yaitu besi cor kelabu (*gray cast iron*) yang memiliki sifat getas (*brittle*). Parameter kekuatan tromol dinyatakan dalam bentuk faktor keamanan (*safety factor*). Faktor keamanan dihitung dengan menggunakan persamaan^[19]

$$SF = \frac{f \cdot \sigma_u}{\sigma_c \cdot c} \quad (18)$$

di mana, c adalah faktor koreksi beban, f merupakan faktor koreksi untuk material yang bersifat getas = 0,5^[7], σ_u adalah kekuatan ultimate material, σ_c adalah tegangan yang terjadi. Hasil numerik faktor keamanan untuk beberapa jenis kondisi operasi dicantumkan pada tabel 9.

Tabel 9 Faktor keamanan tromol

Perlambatan [g]	Faktor Keamanan		
	Jalan datar	jalan membelok	Jalan menurun (10°)
0,1	4,4	3,2	1,4
0,2	2,4	1,4	0,9
0,3	1,2	0,9	0,7
0,4	0,9	0,7	0,5
0,5	0,8	0,6	0,4

Dari hasil analisis di atas terlihat bahwa tegangan pada tromol produk UKM lebih besar dari batas yang diijinkan pada beberapa kondisi operasi kendaraan. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa tromol akan mengalami kegagalan overload jika pengereman dilakukan dengan perlambatan di atas 0,4 g untuk jalan datar atau di atas 0,1g untuk jalan menurun pada kemiringan 10°.

9. KESIMPULAN DAN SARAN PENGEMBANGAN SELANJUTNYA

Dari analisis kegagalan tromol rem yang disajikan pada makalah ini, baik dari segi aspek material maupun aspek pembebanan dapat disimpulkan beberapa hal yaitu :

- Pada sampel yang dianalisis tidak teridentifikasi dengan jelas titik awal dan jejak perambatan retakan. Dari hasil fraktografi dan analisis tegangan dapat diperkirakan bahwa kegagalan adalah akibat over load.
- Komposisi beberapa unsur utama material material drum masih diluar batas-batas yang dipersyaratkan standard. Hal ini merupakan kendala utama dalam industri UKM, karena keterbatasan fasilitas dan bahan baku produk.
- Struktur grafitnya material sangat kasar dengan distribusi B, terutama pada daerah lekukan. Hal ini membuat kekuatan dan ketangguhan retak material yang rendah.
- Variabel kondisi operasi yang paling berpengaruh terhadap beban pengereman adalah nilai perlambatan dan kemiringan jalan. Pengaruh

kecepatan terhadap tegangan terjadi hanya saat kendaraan berbelok.

- Kemiringan jalan menambah beban pada roda depan truk sehingga tegangan drum juga meningkat. Besarnya kenaikan tegangan adalah 58,1 MPa/10° kemiringan jalan.
- Drum rem produk UKM tidak cukup kuat untuk menahan beban pengereman untuk berbagai kondisi operasi kendaraan. Hal ini ditunjukkan dengan faktor keamanan yang lebih kecil dari 1,0.
- Lokasi konsentrasi tegangan terjadi pada daerah lekukan. Hal ini sesuai dengan lokasi salah satu retakan yang sebenarnya terjadi.

Beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut dari hasil penelitian dalam makalah ini adalah :

- Analisis yang disajikan dalam makalah ini belum mempertimbangkan adanya pengaruh tegangan thermal. Aspek tegangan thermal sangat penting untuk diteliti lebih lanjut karena pada saat beroperasi tromol rem akan mengalami temperatur yang tinggi akibat perubahan energi kinetik menjadi kalor melalui mekanisme gesekan.
- Berdasarkan hasil analisis pada makalah ini maka perlu penelitian eksperimental untuk meningkatkan kualitas material tromol produk UKM, rem baik dari segi proses pengecoran, inokulasi, heat-treatment, komposisi kimia, dan design geometri maupun pola tromol

Sumber dana :

- Dana Penelitian yang didasari artikel ini adalah melalui dana "Pengembangan Design, Material, dan Proses Produksi Teromol Rem Bus/Truk Produk Lokal (UKM) untuk Meningkatkan Performansi, Keandalan, dan Daya Saing", Riset Unggulan Kemitraan, Menteri Negara Riset & Teknologi, Grant no. 57/AD-MDI/XII/2000, tahun 2001/ 2002

10. DAFTAR PUSTAKA

1. Newcomb, T.P. and Spurr, R.T., *Automobile Brakes and Braking Systems*, Chapman and Hall Ltd, 1969.
2. Gerdes, J., and Karl, J., 1999, *Brake System Modeling for Simulation and Control volume 121*, ASME, September.
3. Limpert, R., 1992, *Brake Design and Safety*, SAE Inc, Warrendale, USA.
4. Suprihanto, A., 2001, *Identifikasi Penyebab Retak Teromol Rem Bus/Truk Produk PT. Suyuti Sido Maju*, Tesis Magister, Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung.
5. Daimaruya, M. and Kobayashi, H., 1997, *Thermoelasto-Plastic Stresses and Thermal Distortions in a Brake Drum*, Journal of Thermal Stress.
6. Barber JR, Beamond TW, Waring JR, Pritchard C, 1985, "Implication of Thermoelastic Instability for the Design of Brakes", *Transaction of the ASME Journal of Tribology*, vol. 107, pp. 206-210.

7. Champan, T.R., Niesz, D.e., Fox, R.T. and Fawcett, T., 1999, *Wear-Resistant Aluminum-Boron-Carbide Cermets for Automotive Brake Applications*, Elsevier Science S.A.
8. McIntyre D, 1975, "Fractographic Analysis of Fatigue Failures", *Transaction of the ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, pp. 194-205.
9. Shawky GSA, Naga SAR, 1987, "On the Mechanism of Fracture in Gray Cast Iron", *Transaction of the ASME Journal of Engineering Material and Technology*, vol.109, pp. 288-292.
10. Angus HT, 1976, "*Cast Iron Physical and Engineering Properties*", Buttherworths.
11. Day, AJ, 1988, "An Analysis of Speed, Temperature and Performance Characteristic of Automotive Drum Brake", *Transaction of the ASME Journal of Tribology*, vol. 110, pp. 298-305.
12. ASTM Part 31, 1973, *Standard Test Method for Metal-Physical, Mechanical, Non-destructive, and Corrosion Tests, Metallography, Fatigue, Effect of Temperature, Erosion and Wear*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
13. Blanco, C., Bermejo, J., Marsh, H. and Menendez, R. , 1997, *Chemical and Physical Properties of Carbon as Related to Brake Performance*, Elsevier Science S.A.
14. Verma DK, Berry JT, 1982, "Microstructural and Macrostructural Modeling of the Fracture Behavior of Pearlitik Gray Irons", *Transaction of the ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 104, pp. 262-266.
15. Gillespie, T.D., 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers Inc, Warrendale.
16. Wong, J.Y., 1978, *Theory of Ground Vehicle*, John Wiley & Sons Inc,.
17. Puja, I. W., Reza, Ako, H., 2001, "Analisis Tegangan dan Modifikasi Tromol Rem Truk Kapasitas Angkut 6 Ton", *Proceeding Elemen Hingga 2001*, pp.50-59.
18. Huang, Y.M, and Shyr, J.S., 2002, "On Pressure Distributions of Drum Brakes", *ASME Journal of Mechanical Design*, Vol. 124, pp. 115-120.
19. Juvinall, R. C., Marshek, K. M., 1991, *Fundamentals of Machine Component Design*, John Willey and Sons.
20. Sukirman, S., 1994, *Dasar-Dasar Perancangan Geometri Jalan*, Penerbit Nova.
21. ASM Handbook, 1990, "*Properties and Selection Irons, Steels and High Performance Alloys*" , volume 1 edisi 10.