

ANALISA KELUAR REL KERETA API Sugeng Tirta Atmadja & Fitriadi

Abstract

In rail-way system “derailment” problem is important to discuss because the result of this problem can disturb train journey beside that, “derailment” that caused high speed can threaten passenger’s life. There are two cases will be discussed :

1. *“Kontel-moment” consequence centrifugal force when train to be in motion on rail-road which has bend arch with certain radius.*
2. *“Quasi static effect” that cause derailment.*

Abstrak

Dalam perkereta-apian masalah keluar rel (derailment) merupakan masalah yang penting untuk dikaji mengingat akibat-akibat yang disebabkan karena keluar-rel sangat mengganggu kelancaran lalu-lintas perkereta-apian. Selain itu keluar-rel akibat kecepatan yang sangat tinggi dapat mengancam jiwa penumpang maupun orang-orang disekitar kejadian. Ada dua hal yang akan dikaji yaitu :

1. *“Momen-guling” akibat gaya sentrifugal ketika kereta melewati belokan tertentu.*
2. *“Gaya keatas” yang menyebabkan roda anjlok dari rel.*

PENDAHULUAN

Yang disebut peristiwa keluar rel ialah suatu kejadian dimana satu atau lebih pasangan roda dari kereta atau gerbong itu keluar dari rel-nya. Pasangan roda itu bisa tetap berjalan diatas rel karena adanya flens roda, walaupun relnya sekonyong-konyong membelok. Jika, flens roda itu beres, maka secara normal tidak akan terjadi peristiwa keluar rel. Kalau ada unsur-unsur yang tidak beres maka barulah ada kemungkinan terjadinya peristiwa keluar rel.

Menurut keterangan dari Mr. T. Robson dari “British Rail Engineering Ltd.” Dalam ceramahnya di Auditorium Balai Besar PJKA bulan Desember 1979, maka berdasarkan penelitian “The British Rail Research” unsur-unsur kesalahan yang bisa menjadikan sebab terjadinya peristiwa keluar rel adalah :

1. 20% “mechanical failure” (kesalahan mekanis)
2. 20% “Traction & Braking Shocks” (kejutan traksi rem)
3. 20% “Quasi Static Effects” (efek hampir statis)
4. 40% “Dynamic Effects” (efek-efek dinamis)

Uraian mengenai masalah keluar rel dalam makalah ini bukan untuk dapat memecahkan semua peristiwa keluar rel yang terjadi didalam praktek. Sebab, didalam praktek kenyataannya banyak sekali faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya keluar rel baik yang bersifat teknis maupun non-teknis. Yang bersifat non-teknis misalnya : sabotase, erosi, kelalaian petugas dan lain sebagainya tidak akan dibicarakan disini. Juga mengenai patah gandar atau patah rel tidak dipersoalkan disini, karena hal ini apabila terjadi patah rel maka penyebabnya sudah jelas.

Selanjutnya, yang akan dipermasalahkan disini adalah hal-hal yang terkait secara teknis yang memerlukan pembahasan dan penyelidikan yang sek-

sama seperti uraian gaya-gaya yang terjadi sehingga menimbulkan momen-penggulingan ataupun gaya keatas yang bisa mengangkat flens roda keatas kepala rel.

Seperti telah diterangkan dimuka, ada dua macam kekuatan yang bisa menyebabkan peristiwa keluar rel, yaitu yang pertama ialah gaya yang menimbulkan momen guling sehingga terjadi “penggulingan”, dan yang kedua adalah gaya keatas yang menungkit roda sehingga terjadi “roda merayap dan anjlok”.

GAYA CENTRIFUGAL YANG MENIMBULKAN MOMEN GULING SEBAGAI PENYEBAB TERJADINYA MOMEN-GULING

Gaya sentrifugal bebas itu terjadi karena faktor kecepatan pada waktu kereta melewati suatu lengkungan, jadi merupakan unsur dinamis. Gaya sentrifugal ini bekerja pada titik berat kereta dan menuju kearah keluar tikungan. Oleh karena titik berat kereta itu letaknya agak tinggi dari rel, maka gaya sentrifugal ini akan menimbulkan momen guling yang akan menyebabkan kereta terguling.

Bahaya Penggulingan

Bahaya penggulingan ini timbul karena adanya momen guling yang besarnya adalah $C \times H$.

C = gaya sentrifugal bebas

H = titik tinggi kereta dari rel

Pada Gambar-1 dapat dilihat, apabila kereta sedang membelok ke kiri maka dia akan bersendi di titik A. Dengan bersendi dititik A maka gaya sentrifugal C akan menggulingkan kereta dari tikungan.

Dengan adanya momen guling sebesar $C \times H$, maka timbullah “momen reaksi” yang disebabkan oleh

beratnya gerbong itu sendiri. “Momen Reaksi” ini bekerja menahan kereta agar tidak terguling, maka disebut juga “momen penahan” atau “momen stabilisator”.

$$\frac{G \cdot v_t^2}{g \times R} \times H = G \times \frac{1}{2} b$$

$$v^2 = \frac{gRb}{2H} = \frac{g}{2} \times \frac{H}{b} \times R$$

Jadi kecepatan kereta pada titik kritis ini adalah :

$$v = \sqrt{\frac{g}{2} \times \frac{H}{b} \times R} \quad (\text{meter / detik})$$

dimana :

- g = gravitasi bumi (m/s²)
- H = tinggi titik berat kereta dari rel (m)
- b = lebar sepur (m)
- R = jari-jari kelengkungan (m)

Gambar-1 :

Gambar kereta membelok lewat tikungan kekiri

Keterangan :

- Z = titik berat kereta
 - G = berat kereta dalam kg
 - C = gaya sentrifugal dalam kg
 - H = jarak titik berat kereta dalam kg
 - b = lebar sepur
 - R = jari-jari lengkungan
 - H, b, dan R diukur dalam meter
- Besarnya gaya sentrifugal adalah

$$C = m \times \alpha_n = \frac{G \cdot v_t^2}{g \times R}$$

dimana :

- m = massa dari kereta (kg.s²/m)
- α_n = percepatan radial (m/s²)
- V_t = kecepatan kereta (m/s)
- R = jari-jari kelengkungan (m)
- G = gaya penarikan bumi (m/s²)

Dengan adanya momen guling sebesar C x H, maka timbulah “momen reaksi” yang disebabkan oleh beratnya gerbong itu sendiri. “Momen reaksi” ini bekerja menahan kereta agar tidak terguling, maka disebut juga “momen penahan” atau “momen stabilisator”.

Pada titik kritis, dimana akan terjadi momen penggulingan, maka hal ini berarti bahwa besarnya “momen guling” (M_g) itu sudah menyamai “momen stabilisator” (M_{st}).

Dan terdapatlah persamaan sebagai berikut :

$$M_g = M_{st}$$

Kalau dinyatakan dalam km/jam maka terdapatlah :

$$v = \sqrt{\frac{g}{2} \times \frac{H}{b} \times R} \quad (\text{km / jam})$$

$$3.6 \times \sqrt{\frac{g}{2} \times \frac{H}{b} \times R} = B$$

disebut juga dengan faktor muatan lengkungan.

Faktor muatan ini untuk semua jenis kereta tertentu adalah mempunyai nilai yang tetap besarnya, yaitu tergantung dari letak titik berat kereta dari rel. Dengan memperhitungkan faktor muatan lengkungan ini, maka kecepatan kritis yang menyebabkan penggulingan didalam suatu tikungan dengan jari-jari R adalah sebagai berikut :

$$v = B \times \sqrt{R} \quad (\text{km / jam})$$

Dari uraian diatas ternyata yang menimbulkan momen penggulingan adalah gaya sentrifugal yang besarnya ditentukan oleh kuadrat dari kecepatan kereta api sewaktu melewati suatu tikungan. Jadi yang memperbesar bahaya penggulingan adalah tingginya kecepatan kereta ketika melewati tikungan tertentu, dan ini merupakan efek dinamis.

Peninggian Rel-Luar Dalam Tikungan

H = kemiringan
 α = sudut kemiringan

Pada Gambar-2 kereta membelok ke kiri pada lintasan yang terdapat peninggian rel luar akibat dari peninggian rel luar ini, maka kecepatan kritis bisa agak lebih tinggi serupa dengan penurunan diatas maka untuk $\sin \alpha = 0.1$ (maksimum) dan $\cos \alpha = 0.995$ (dibulatkan ke arah aman, $\cos \alpha = 1$) maka didapat "Faktor muatan lengkungan" adalah :

$$\sqrt{\frac{127}{2 \frac{h}{b}} + 127 \sin \alpha}$$

Sehingga kecepatan kritisnya adalah

$$v = \sqrt{\frac{127}{2 \frac{h}{b}} + 127 \sin \alpha} \cdot \sqrt{R}$$

untuk kereta yang mempunyai letak $h = 1.5$ m, maka hubungan antara jari-jari kelengkungan rel dan kecepatan kritis dapat dilihat dalam grafik berikut ini :

Gambar-2 :

Keterangan :

- Z = titik berat kereta
- G = titik berat kereta
- C = gaya sentrifugal
- H = jarak titik berat kereta sampai kepala rel
- b = lebar sepur
- R = jari-jari kelengkungan

GAYA KEATAS YANG MENGANGKAT RODA SEBAGAI PENYEBAB TERJADINYA KELUAR REL

Peristiwa ini dapat terjadi pada kecepatan rendah, yaitu hampir statis, jadi bukan disebabkan karena masalah kecepatan tinggi. Disini akan disajikan suatu uraian dengan mengambil dasar tipe kendaraan rel yang sudah lazim, yaitu bergandar dua atau beroda empat.

Uraian Gaya-Gaya Dalam Kedudukan Muntir

Seperti yang diterangkan dimuka, maka yang menjamin bahwa kendaraan rel itu dapat berjalan

dengan aman diatas rel adalah karena adanya flens roda. Bila roda pada sebelah rel luar itu terangkat sedemikian

Seperti disebutkan diatas, kita mengambil sebagai dasar adalah tipe kendaraan rel beroda empat, dimana rangka dasar dianggap kaku sempurna dan pegasnya berada diluar pasangan roda sebagaimana diperlihatkan pada Gambar-3.

Dengan menganggap rangka dasar itu kaku sempurna maksudnya adalah, bahwa kita bisa melenturkan salah satu ujungnya itu terhadap sumbu diagonal. Demikian itulah gambaran umum mengenai gerbong dengan ukuran sepur sempit seperti di PT. KAI dimana penempatan pegas-pegas itu berada diluar

pasangan roda. Lebih-lebih pada gerbong tangki dan rangka dasar itu merupakan satu kesatuan yang kaku sekali. Disamping itu kita juga menganggap bahwa beban muatannya terbagi secara simetris.

Dalam kondisi seperti itu dengan tegas kita dapat mengatakan bahwa tiga titik kontak dari tiga buah roda padan rel akan terletak dalam satu bidang datar. Kemudian kita akan mencoba menurunkan rel yang berada dibawah roda ke-empat itu sedikit demi sedikit.

Gambar-3

Keterangan :

- | | |
|---|-------------|
| - berat kereta atau gerbong seluruhnya | Q kg |
| - berat bagian yang tidak bertumpu pada gandar | K kg |
| - berat bagian yang bertumpu pada gandar | P kg |
| - pemegasan spesifik | f mm/kg |
| - gaya-gaya reaksi pada pegas | A dan B kg |
| - jarak antar pusat pegas | c mm |
| - lebar sepur | b mm |
| - perbedaan pemegasan spes. antara ke dua pegas | X mm |
| - perbedaan tinggi antara kedua roda | ½ Z1 mm |
| - jarak antara kedua roda dan pegas | 2 a = (c-b) |

Keadaan keseimbangan gaya-gaya yang bekerja pada gandar diperlihatkan dalam Gambar-3. Disini suatu kesalahan yang kecil akan kita abaikan yaitu perpindahan titik berat kereta. Situasi yang diperlihatkan dalam Gambar-3 adalah suatu keadaan, dimana roda pada B tidak ikut menyangga beban muatan sehingga seluruh beban sebesar ½ Q akan disangga sendiri oleh roda pada A. Untuk mengetahui besarnya beban A dan B itu dapat dihitung dengan persamaan momen statis sebagai berikut :

1. momen terhadap titik B

$$Ac = \frac{1}{2} Q(b + a) - \frac{1}{2} K(a + \frac{1}{2} b)$$

$$A = \frac{1}{2} Q \left(\frac{b + a}{c} \right) - \frac{1}{2} K \left(\frac{a + \frac{1}{2} b}{c} \right)$$

2. momen terhadap titik A

$$Bc = \frac{1}{2} Qa - \frac{1}{2} K(a + \frac{1}{2} b)$$

$$B = \left(\frac{1}{2} Q \frac{a}{c} \right) - \frac{1}{2} K \left(\frac{a + \frac{1}{2} b}{c} \right)$$

Sedangkan perbedaan panjang kedua pegas adalah = X mm dimana X = (A-B).f mm.

Kalau harga A dan B dari persamaan 1 dan 2 dimasukkan kedalam persamaan 3 maka kita akan mendapatkan

$$X = \frac{1}{2} Q \frac{b}{c} x f \text{ mm}$$

Kalau roda dimana B bekerja akan terangkat apabila roda ini sudah tidak memberi tekanan pada rel. Inilah keadaan yang diperlihatkan pada Gambar-3. Pada keadaan ini maka turunnya roda yang satu terhadap yang lain adalah sebesar

$$\frac{1}{2} Z1 = X \frac{b}{c}$$

Dengan memasukkan harga X diatas maka terdapatlah :

$$\frac{1}{2} Z1 = \frac{1}{2} Q \frac{b}{c} x f \frac{b}{c} \text{ atau } Z1 = f \left(\frac{b}{c} \right)^2 Q$$

tentu saja apa yang diperlihatkan pada gambar-3 adalah keadaan yang tidak sebenarnya. Gambar-3 itu hanyalah dipakai untuk menjelaskan besarnya perbedaan tinggi antara dua buah roda, dimana yang satu sudah tidak menekan pada rel (yaitu roda B). Sedangkan ketiga roda lainnya masih menekan pada rel dengan menerima beban gaya masing-masing sebesar :

- roda A = ½ Q
- roda C = ¼ Q
- roda D = ¼ Q

pada keadaan yang sebenarnya adalah sebagai berikut :

Gambar-4

Pada keadaan ideal keempat roda itu memikul beban yang sama besar, yaitu sebesar ¼ Q. Dengan penurunan rel dibawah roda B, maka beban yang dipikul oleh roda A dan C adalah (¼Q + ¼Q), sedangkan yang dipikul oleh roda B dan D adalah

($\frac{1}{4}Q - \nabla Q$) lihat Gambar-4. Hal ini disebabkan karena dasar-dasar (frame) itu dianggap kaku sempurna seperti yang telah dikatakan dimuka tadi. Jadi tidaklah mungkin untuk membuat beban pada roda B = 0 sedangkan pada roda D adalah $\frac{1}{4} Q$, tetapi kedua roda ini akan selalu menerima pengurangan yang sama.

Pada waktu gaya antara roda B dan rel adalah = 0, maka akan terjadi hal yang sama pada roda D. Atau dengan perkataan lain, penurunan rel sampai roda B dan D tidak memikul beban itu bukanlah $\frac{1}{2} Z1$, tetapi adalah $2 \times \frac{1}{2} Z1 = Z1$.

Dengan penurunan rel dibawah roda B sebesar Z1 mm, maka roda B tidak lagi ditumpu oleh rel, dan kerangka akan berayun-ayun pada poros diagonal AC. Apabila penurunan rel ini melebihi Z1 mm, maka ayunan akan terjadi dan yang masih mencegah untuk tidak keluar rel adalah flensnya saja. Tanpa adanya flens ini maka kereta sudah akan keluar rel sebagai akibat dari penurunan rel dibawah roda B ini. Gejala ini bisa terlihat apabila kereta sedang menjalani "superelevation" dalam memasuki sebuah tikungan.

Dimuka tadi kita memperhatikan sebuah gerbong, dimana beban disalah satu rodanya menjadi nol hanya karena adanya penurunan rel dibawah roda tersebut. Dalam praktek, gejala ini memang selalu terjadi apabila gerbong itu melewati sebuah "superelevation" pada tikungan peralihan, atau apabila rel lebih rendah pada sebelah pihak (scheluw atau distorsi).

Kedudukan relatif pasangan rel pada superelevation itu diperlihatkan dalam Gambar-5.

Gambar-5

Gambar-6

Bila jarak antara gandar = t, maka penurunan rel dibawah roda seperti yang diuraikan diatas adalah sebesar $t/400$. Ini berarti bahwa apabila harga Z1 tadi sama dengan $t/400$ atau lebih maka akan terjadi bahaya keluar rel.

Gambar-7

Gambar-8

Kecuali superelevation masih adapula kemungkinan adanya pelenturan rel, dimana rel yang satu lebih rendah dari pada yang lain. Pelenturan rel ini untuk lintas raya dibatasi sampai maksimal 7,5 mm pada jarak 5 mm lihat Gambar-8.

Kedua hal tersebut diatas adalah suatu kondisi jalan kereta-api yang memungkinkan terjadinya suatu peristiwa "keluar rel". Semakin rendah harga Z1 pada suatu jenis kereta atau gerbong, maka semakin besarlah tingkat bahaya keluar rel bila menjumpai penurunan rel atau distorsi.

KESIMPULAN

1. Berat Kereta
Disini ternyata, bahwa kereta/gerbong yang kosong adalah lebih "peka" terhadap bahaya keluar rel dan juga lebih peka terhadap getaran-getaran dari ban, bila dibandingkan dengan kereta/gerbong yang bermuatan penuh.
2. Harga Perbandingan (b/c)
Semakin kecil perbandingan harga (b/c), maka semakin peka dia terhadap bahaya "keluar rel". Inilah salah satu faktor yang menjadi sebab mengapa sepur sempit itu lebih mudah mengalami "derailment" bila dibandingkan sepur lebar. Demikian juga harga $(b/c)^2$ pada sepur sempit (1067) kira-kira hanyalah = 0,35 sedangkan pada sepur dengan ukuran standar (1435) adalah 0,56.
3. Harga pemegang spesifik (f)
Kereta-kereta dengan pegas yang lebih keras atau kaku (f kecil) akan lebih mudah mengalami derailment. Pegas-pegas yang dipergunakan pada gerbong barang adalah jauh lebih keras (kaku) dari pada gerbong pada kereta-kereta penumpang. Itulah sebabnya mengapa gerbong-gerbong barang lebih mudah mengalami "derailment" dari pada kereta-kereta penumpang.

DAFTAR PUSTAKA

1. Meriam J.L., Engineering Mechanics Volume I : Dynamic”, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 1987.
2. Subianto, Drs., Dinamika Kendaraan Rel, Jakarta, 1983.