

Simulasi Numerik Dalam Studi Awal Desain *Guide Wheel Base* Bogie untuk Meningkatkan Mampu Belok Monorel Produksi PT. MBW

Danardono AS¹, Gatot Prayogo¹, Sugiharto¹, Gandjar Kiswanto¹, Tresna P. Soemardi¹,
Kusnan Nuryadi², Teguh Nugraha²

¹Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok 16424, Jawa Barat

²PT. Melu Bangun Wiweka, Jl. Simpang Tiga Setu No. 39 Tambun Bekasi 17510, Jawa Barat
E-mail : danardon@eng.ui.ac.id

Abstrak

Monorel adalah salah satu moda MRT berupa kereta berbasis rel tunggal yang umumnya dipasang pada posisi yang ditinggikan (*elevated*) dari permukaan jalan, jalur lintasan disangga oleh sejumlah tiang yang dibangun disepanjang separator jalan raya. Monorel terbagi dalam dua jenis *suspended* dan *straddle*. Jenis *straddle* merupakan jenis yang paling banyak digunakan sebagai sarana transportasi perkotaan, karena memiliki kelebihan yang dapat diaplikasikan dalam berbagai jenis ukuran, sesuai dengan volume kebutuhan dan tingkat pelayanan yang diinginkan. Proses rancang bangun monorel jenis *straddle* sudah dilakukan di industri lokal salah satunya di PT. MBW. Hal penting yang harus diperhatikan dalam rancangan bangun tersebut adalah bagaimana monorel yang dibuat dapat digunakan secara aman, nyaman dan mampu diaplikasikan diberbagai kondisi topografi perkotaan di Indonesia. Sementara perkotaan di Indonesia umumnya merupakan kota yang sudah berkembang, dengan kondisi tata ruang yang relatif tidak menyediakan dan menyiapkan area untuk fasilitas monorel dalam sistem transportasi massalnya. Dalam kondisi tersebut sangat dimungkinkan akan timbulnya tuntutan desain yang melebihi standar desain monorel pada umumnya. Standar desain yang perlu ditingkatkan adalah kemampuan belok (*turning-ability*) dan kemampuan untuk menanjaknya (*gradient-ability*). Saat ini kemampuan belok maksimum berada pada radius 45-60 m, dan kemampuan menanjaknya berada pada gradien 5-6 %. Dalam makalah ini dijelaskan studi awal dalam pengembangan desain struktur bogie dalam usaha meningkatkan mampu belok dengan pertimbangan kesetabilan dinamikanya. Peningkatan mampu belok dilakukan dengan melakukan analisis terhadap panjang sumbu roda kemudi (*guide wheel base*) dan posisi roda penyetabil (*stabilizing wheel*). Hasil analisis posisi roda penyetabil yang diposisikan diantara roda kemudi dan sejajar roda kemudi memberikan hasil yang berbeda, dimana pada saat berbelok bogie dengan posisi roda penyetabil yang dipasang sejajar dengan posisi roda kemudi menghasilkan gerakan yang lebih cepat dibanding dengan bogie dengan posisi roda penyetabil yang dipasang diantara rodanya.

Keywords: Bogie, Monorel, *Straddle*, *Turning Ability*, Industri Lokal

Pendahuluan

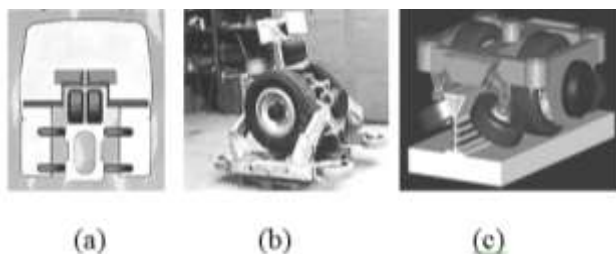
Monorel adalah alat transportasi berbasis rel tunggal yang berfungsi sebagai penuntunnya (*guide-way*). Istilah ini digunakan untuk menggambarkan sistem atau kendaraan perjalanan di atas balok atau *track* yang menuntunnya. Istilah ini berasal dari gabungan kata *mono* (tunggal) dan *rail* (rel), istilah ini digunakan sejak 1897. Sistem transportasi ini sering disebut kereta rel tunggal (monorel). Sedangkan sistem *light rail* menggunakan rel ganda sebagai penuntun gerakannya. Kendaraan yang berjalan pada rel tunggal pertama dipatenkan oleh *Henry Robinson Palmer* di Inggris dengan paten nomor 4618 tanggal 22 November 1821. Pengaplikasian monorel untuk *mass rapid transit* pertama

diusulkan oleh *Edward H. Anson* (1954), usulan tersebut dipertegas oleh *Hermann* (1957), dengan membuat studi kelayakannya.

Monorel terbagi dalam dua jenis yaitu *suspended* dan *straddle*. Jenis *straddle* merupakan tipe monorel yang paling banyak digunakan sebagai sarana transportasi perkotaan, monorel jenis ini memiliki kelebihan dapat diaplikasikan dalam berbagai jenis ukuran yang disesuaikan dengan volume kebutuhan dan tingkat pelayanannya. Dilihat dari kelebihannya monorel jenis ini dapat dijadikan solusi sarana transportasi diperkotaan pada jarak dekat dan menengah. Solusi ini sangat sesuai dengan konsep sistem transit ringan untuk mobilitas perkotaan dalam pembangunan sistem transportasi yang berkelanjutan.

Monorel jenis *straddle* merupakan monorel yang paling banyak diaplikasikan, karena memiliki keunggulan lebih dibanding jenis lainnya. *Ishikawa* (1999) seorang senior engineer dari *Hitachi, Ltd*, membuat prediksi dengan berbagai macam pertimbangan dan alasan, bahwa sistem monorel jenis *straddle* akan memimpin sistem transportasi massal di masa datang, hal ini didasarkan kepada kemungkinan monorel jenis ini untuk diaplikasikan dalam berbagai jenis ukuran, disesuaikan dengan kebutuhannya. Pernyataan ini diperkuat oleh rekannya, *Kubawara* (2001), yang mengusulkan monorel jenis *straddle* tipe kecil sebagai solusi transportasi diperkotaan jarak sedang, dengan alasan dan keuntungan dalam hal perbaikan lingkungan, masa pengerjaan konstruksi, dan efisiensi biaya konstruksinya. Konsep ini diperkuat oleh *Siu* (2007), yang membuat analisis dari inovasi sistem transit ringan untuk mobilitas perkotaan dalam perspektif pembangunan dan perencanaan sistem transportasi yang berkelanjutan.

Monorel jenis *straddle* ditinjau dari bentuk *footprint*-nya dibagi tiga kelompok yaitu *Alweg*, *Steel Box Beam*, dan *Inverted T*. *Alweg* adalah nama pabrikan yang pertama mengembangkan monorel dengan menggunakan *footprint* jenis ini. Model *footprint Alweg* banyak digunakan oleh pabrikan lain seperti *Bombardier*, *Hitachi*, dan *Scomi*. *Steel box beam* adalah jenis monorel *straddle* yang umumnya menggunakan lintasan (*guide-way*) dari struktur baja, monorel jenis ini umumnya memiliki ukuran kecil dan banyak diaplikasikan diperkotaan jarak pendek atau disuatu kawasan pariwisata. Monorel jenis *straddle* model *inverted T* adalah jenis monorel *straddle* dengan bentuk penampang *guide-way* yang menyerupai huruf T terbalik

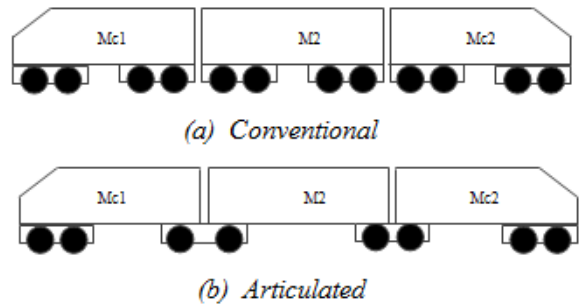


Gambar 1. Tipe *footprint* monorel jenis *straddle*
(a) *alweg type* (b) *steel box beam type*
(c) *inverted T type*
(sumber: www.monorail.org)

Bogie Monorel Jenis *Straddle*

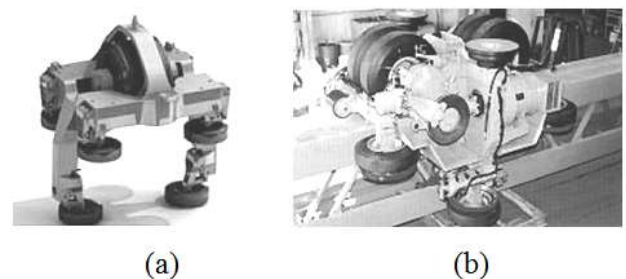
Bogie berfungsi sebagai tumpuan badan monorel,

pada bogie tersebut ditempatkan roda traksi sebagai roda penggerak, roda kemudi sebagai pengarah gerakan, dan roda penyetabil sebagai penyangga gerak *rolling* bogie dan badan monorel. Dua unit bogie umumnya dipasang pada tiap badan monorel (*conventional*), akan tetapi ada juga yang dipasang pada posisi sambungan diantara dua badan monorel (*articulated bogie*). Pengerak monorel umumnya menggunakan motor listrik yang ditempatkan pada masing-masing bogie.



Gambar 2. Model Instalasi Bogie monorel

Monorel dengan bogie yang dipasang pada sambungan badan monorel memiliki radius belok yang lebih kecil dibanding model independen (*conventional*). Konstruksi bogie monorel jika dilihat dari jumlah poros yang digunakan terdiri dari dua jenis yaitu poros tunggal (*single axle*) dan poros ganda (*double axle*). Bogie dengan poros tunggal (*single axle*) memiliki radius belok lebih kecil dan lebih ringan dibanding poros ganda, akan tetapi kemampuan menyangga bebannya relatif rendah dibanding poros ganda (*double axle*).

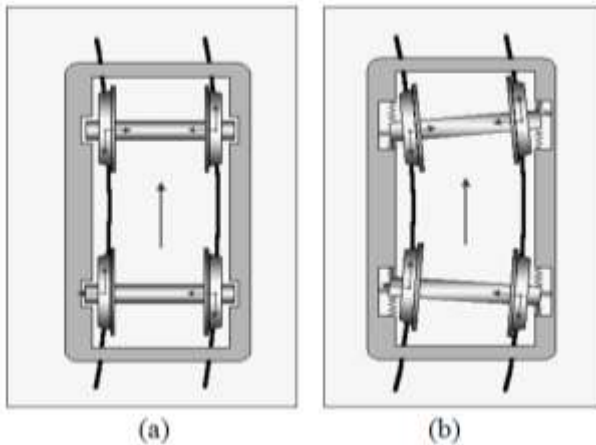


Gambar 3. (a) *single axle bogie* (b) *double axle bogie*
(sumber: www.monorail.org)

Saat ini monorel jenis *straddle* umumnya menggunakan bogie dengan jenis poros ganda (*double axle*). Karena memiliki keunggulan dalam menumpu beban dan kesetabilan gerakannya.

Poros bogie jenis ganda ditinjau dari desain tingkat kemampuan saat berbelok dibagi dua yaitu *Conventional Fixed-axle Bogie* dan jenis *Steerable-axle Bogie*. Jenis *steerable* memiliki kesetabilan belok lebih baik dibanding dengan jenis *fixed*. Karena jarak *wheel base* roda di radius dalam lebih kecil dibanding *wheel base* roda di radius luar nya, begitu pula untuk sebaliknya.

Poros bogie jenis ganda ditinjau dari desain tingkat kemampuan saat berbelok dibagi dua yaitu *Conventional Fixed-axle Bogie* dan jenis *Steerable-axle Bogie*. Jenis *steerable* memiliki kesetabilan belok lebih baik dibanding dengan jenis *fixed*. Karena jarak *wheel base* roda diradius dalam lebih kecil dibanding *wheel base* roda diradius luarnya, begitu pula untuk sebaliknya.



Gambar 4. (a) *Fixed axle bogie* (b) *Steerable axle bogie*
(sumber: www.railway-technical.com)

Gerak Lintasan Kurvatur Monorel

Untuk mencegah terjadinya *over-turning* yang akan berakibat fatal terhadap kesetabilan dan kenyamanan gerak monorel, maka dibuat standar dalam bentuk prosentase hubungan antara kecepatan gerak terhadap radius putarnya. Prosentase hubungan ini disebut dengan *Cant*. Dalam *Technical Regulatory Standards on Japanese Railways* yang dikeluarkan tahun 2012 prosentase *Cant* untuk monorel jenis *straddle* didefinisikan

$$C = \frac{V^2}{1.27R} \quad (\%) \quad (1)$$

dimana *C* adalah prosentase *Cant* (%), *V* adalah laju kecepatan gerak monorel (km/h), dan *R* adalah radius putar *guide-way* (m). Prosentase *Cant* digunakan untuk penyetabilan gaya sentrifugal yang terjadi akibat gerak monorel saat melintas pada kurva yang melingkar. Kecepatan gerak monorel saat melintasi kurva melingkar didefinisikan

$$V = \sqrt{1.27CR} \quad (\text{km/h}) \quad (2)$$

Rentang laju gerakan harus berada dalam rentang kecepatan gerak sebagai berikut.

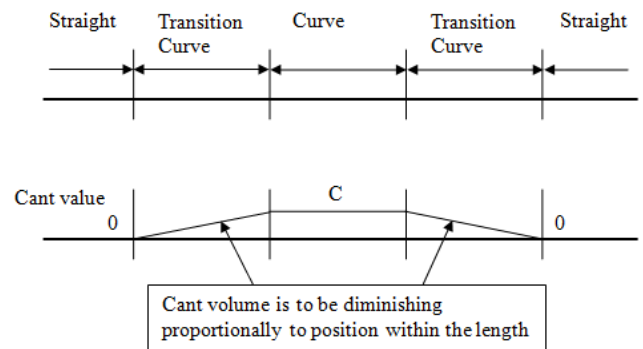
$$\sqrt{1.27(C+5)R} > V > \sqrt{1.27(C-3)R} \quad (3)$$

Dari persamaan (3) defisiensi *Cant* berada dalam rentang (5–3)%. Panjang kurva transisi pada saat berbelok dihitung dengan persamaan.

$$L = \frac{V^3}{14R} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

Dimana *L* adalah panjang kurva transisi (m). Ini digunakan untuk mengontrol laju perubahan gaya sentrifugal yang terjadi bawah 0.03 g/sec. sedang untuk perubahan sebesar 0.0364 g/sec panjang kurva transisi didefinisikan

$$L = \frac{V^3}{17R} \quad (\text{m}) \quad (5)$$



Gambar 5. Laju Perubahan prosentase *Cant*

Radius kurva vertikal didefinisikan dengan persamaan

$$R_v = 0.26V^2 \quad (\text{m}) \quad (6)$$

dimana *R_v* adalah jari-jari kurva vertikal (m), jari-jari kurva vertikal minimum selalu ditentukan sebesar pada 1000 m, dengan panjang kurva vertikal lebih besar dari 15 m.

Monorel Produksi PT. MBW

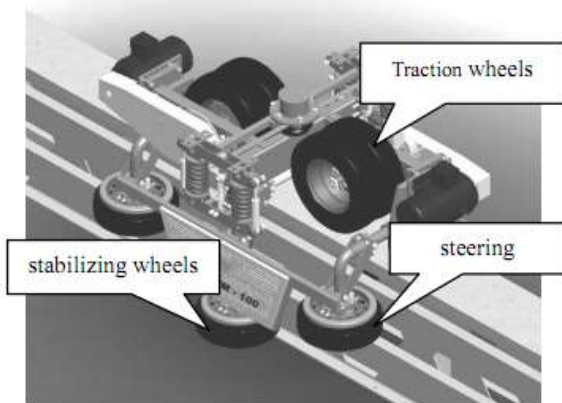
Kegiatan rancang bangun monorel yang dilakukan oleh PT. MBW saat ini sudah pada tahap pembuatan prototipe. Model bogie yang digunakan pada monorel produksi PT. MBW adalah menggunakan model *Alweg* dengan jenis poros ganda. Monorel yang diproduksi PT. MBW dirancang dengan kapasitas angkut 125 penumpang per gerbongnya dengan desain rangkaian bisa sampai enam gerbong untuk setiap rangkaiannya.

Simulasi

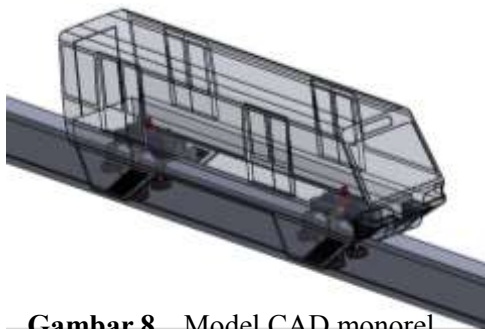
Simulasi model bogie monorel buatan PT. MBW dilakukan secara numerik dengan bantuan perangkat lunak *Solidworks Motion Study*.



Gambar 6. Prototipe monorel Buatan PT. MBW
(sumber : PT. Melu Bangun Wiweka)



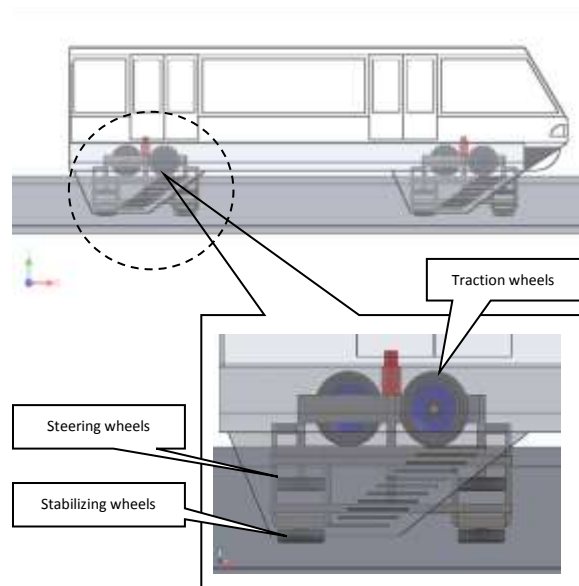
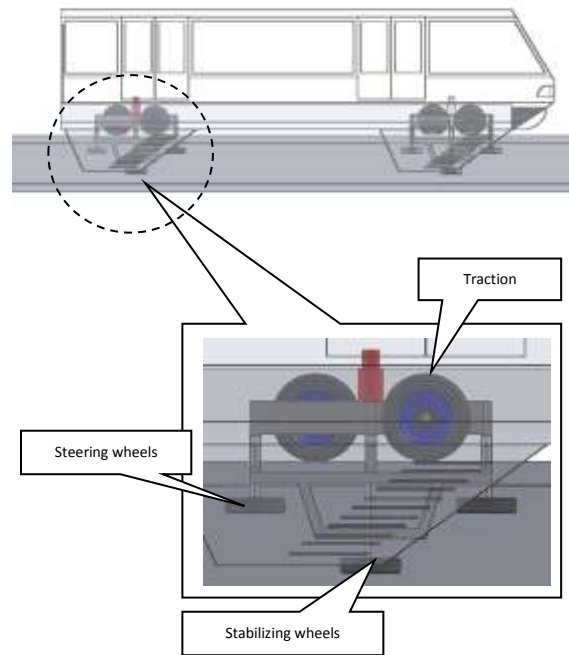
Gambar 7. Model CAD prototipe bogie monorel buatan PT. MBW



Gambar 8. Model CAD monorel

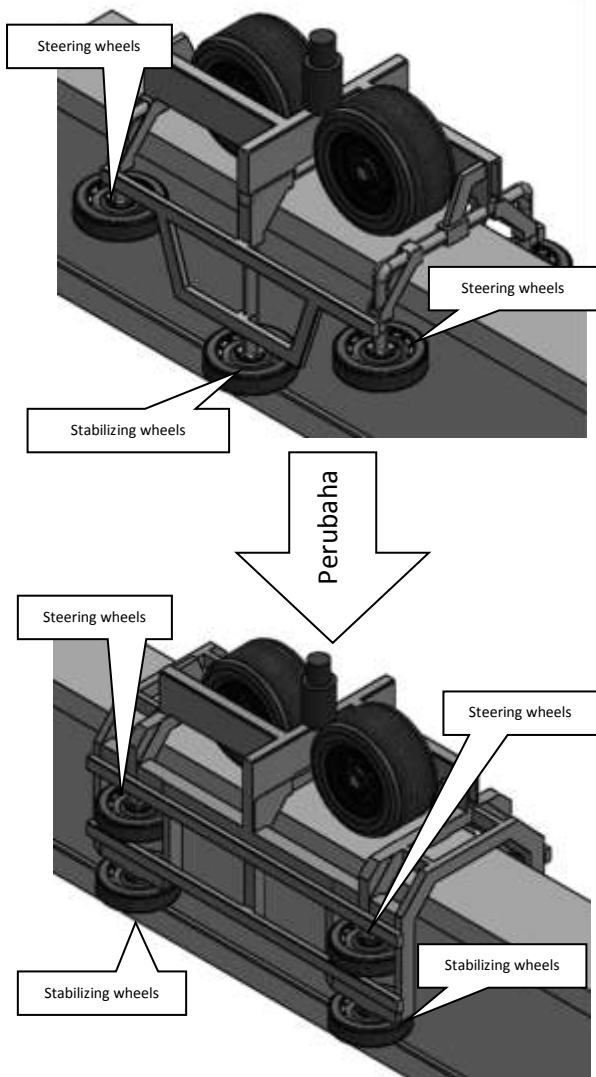
Monorel yang dibuat oleh PT. MBW memiliki berat total 24.000 kg/car dengan berat bogie masing-masing 1.5 ton. Laju gerak monorel didesain dengan kecepatan maksimum 70 km/h dikondisi lintasan lurus dan 20 km/h dikondisi lintasan kurvatur. Radius kurvatur minimum yang bisa dilalui oleh monorel produksi PT. MBW adalah 1000 m untuk kurvatur vertikal dan 60 m untuk kurvatur horizontal. Sedangkan kemampuan menahan maksimum pada gradien 5 %. Motor

penggerak dipasang untuk masing-masing roda traksi 45 kW dengan putaran 1503 rpm.



Gambar 9. Pemodelan bogie untuk tahapan simulasi pada monorel

Simulasi dilakukan tanpa memasukan elemen dari komponen suspensi. Simulasi awal ini hanya dilakukan untuk melihat perubahan yang terjadi dari kondisi *guide wheel base* terhadap perubahan posisi pemasangan *stabilizing wheel* dari posisi diantara *steering wheel* ke posisi sejajar dengan *steering wheel*-nya.

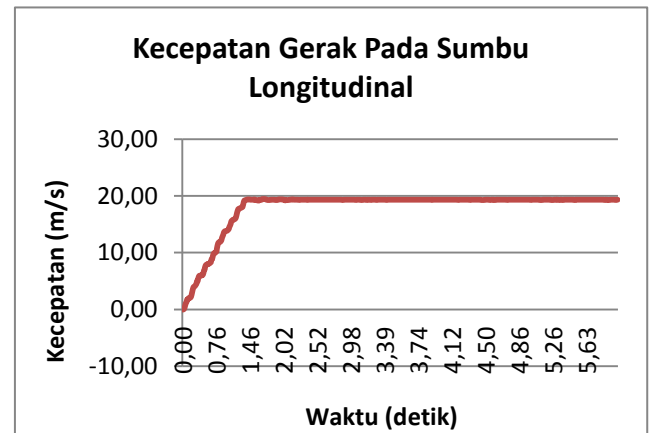


Gambar10. Perubahan pemasangan *stabilizing wheels*

Hasil dan Pembahasan

Dalam simulasi ini yang menjadi topik kajian hanya pada mobilisasi yang terjadi dari dua buah kondisi dalam penempatan *stabilizing wheel*, yang ditempatkan diantara dan sejajar dengan *steering wheel*-nya. Analisis ditinjau pada laju gerak bogie terhadap sumbu longitudinalnya, analisis kontak yang terjadi pada *steering wheel* dan *stabilizing wheel* tidak dilakukan karena komponen suspensi belum dimasukkan dalam simulasinya. Kondisi batas diberikan adalah kecepatan gerak monorel pada saat lurus sebesar 70 km/h (19.46 m/s), sedangkan untuk lintasan kurvatur diberikan sebesar 20 km/h (5.56 m/s) pada lintasan dengan jari-jari kurvatur 60m. Beban yang diterima untuk masing-masing bogie adalah sebesar 10.5 ton yang diberikan secara vertikal, besaran ini diambil karena berat gerbong berikut penumpang diasumsikan sebesar 24 ton, sedangkan berat

masing-masing bogie diasumsikan sebesar 1.5 ton. Kontak antara roda dan lintasan *guide-way* dimodelkan dengan kontak karet dan baja dalam kondisi kering. Hasil simulasi ditampilkan dalam bentuk grafik sebagai berikut.



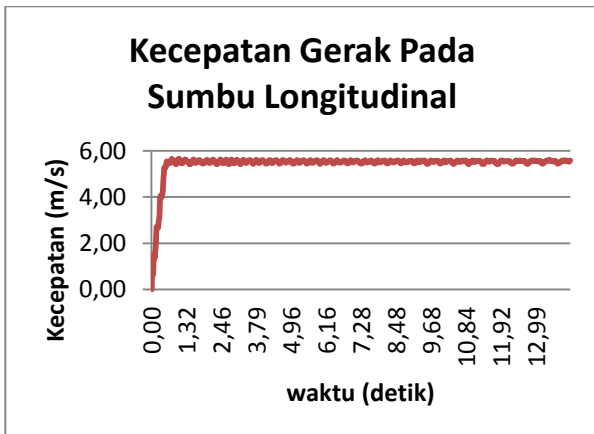
Gambar 11. Kecepatan gerak bogie dengan *stabilizing wheel* berada diantara *steering wheel* pada lintasan lurus dengan kecepatan gerak 70 km/h (19.46 m/s)



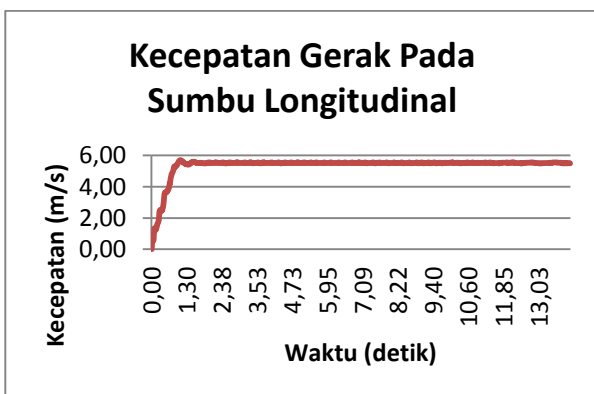
Gambar 12. Kecepatan gerak bogie dengan *stabilizing wheel* berada sejajar dengan *steering wheel* pada lintasan lurus dengan kecepatan gerak 70 km/h (19.46 m/s)

Dari dua grafik di atas bogie dengan posisi *stabilizing wheel* berada di antara *steering wheel* untuk kondisi lintasan lurus memiliki mobilisasi yang lebih baik dibanding bogie dengan *stabilizing wheel* sejajar dengan *steering wheel*. Hal ini terjadi karena pada bogie dengan penempatan *stabilizing wheel* sejajar dengan *steering wheel*, jumlah *stabilizing wheel* menjadi dua kalinya dari pada bogie dengan penempatan *stabilizing wheel* diantara *steering wheel*. Hal ini mengakibatkan gesekan akibat kontak yang terjadi antara *guide-way* dengan roda (*traction wheel*, *steering wheel*, dan *stabilizing wheel*) menjadi lebih besar, gesekan ini yang menjadi

penghambat gerak mobilisasinya. Mobilisasi gerak bogi disaat melintasi lintasan kurvatur, disimulasikan sebagai berikut:



Gambar 13. Kecepatan gerak bogie dengan *stabilizing wheel* berada diantara *steering wheel* pada lintasan kurvatur dengan jari-jari 60 m dengan kecepatan gerak 20 km/h (5.56 m/s)



Gambar 14. Kecepatan gerak bogie dengan *stabilizing wheel* ditempatkan pada posisi sejajar dengan *steering wheel* pada lintasan kurvatur dengan jari-jari 60 m dengan kecepatan gerak 20 km/h (5.56 m/s)

Dari simulasi pada lintasan kurvatur dengan radius 60 m dengan posisi *stabilizing wheel* dipasang sejajar dengan *steering wheel* memiliki mobilisasi yang lebih baik dibanding bogie dengan *stabilizing wheel* yang dipasang diantara *steering wheel*.

Hal ini terjadi karena pada bogie dengan penempatan *stabilizing wheel* sejajar dengan *steering wheel*, tidak terjadi hambatan gerak (*constraints*) dari posisi *stabilizing wheel* di konstruksi pemasangannya.

Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang dilakukan dalam studi awal desain guide wheel base monorel buatan PT. Melu Bangun Wiweka (MBW) adalah sebagai berikut:

- Bogie dengan *stabilizing wheel* yang dipasang diantara *steering wheel* pada saat melintasi lintasan lurus memiliki mobilisasi yang lebih baik dibanding dengan bogie dengan *stabilizing wheel* yang dipasang sejajar dengan *steering wheel*-nya.
- Bogie dengan *stabilizing wheel* yang dipasang diantara *steering wheel* memiliki mobilisasi kurang baik pada saat melintasi lintasan kurvatur dibanding dengan bogie dengan *stabilizing wheel* yang dipasang sejajar dengan *steering wheel*-nya.
- Perlu dirancang sebuah model bogie dengan memiliki mobilisasi yang baik untuk setiap bentuk lintasan, saah satunya dengan membuat model bogie dengan jenis *steerable axle*.

Ucapan Terima kasih

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Direktorat Riset dan Pengabdian pada Masyarakat (DRPM) Universitas Indonesia, PT. Melu Bangun Wiweka (MBW) dan DP2M Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan RI yang telah membiayai penelitian ini melalui Hibah Penelitian Riset Andalan Perguruan Tinggi (RAPID) tahun 2013.

Nomenklatur

- C Prosentase *Cant* (%)
- V Laju kecepatan gerak monorel (km/h)
- R Radius kurva horizontal *guide-way* (m)
- R_v Radius kurva vertikal *guide-way* (m)
- L Panjang kurva transisi (m)

Referensi

- Edward H. Anson, "Monorail System for Mass Rapid Transit", Gibb & Hill, Inc. Consulting Engineer, New-York, April 1954
- Hermann, "The Feasibility of Monorail", Master Theses Civil Engineering Department at Massachusetts Institute of Technology, September 1959.
- Kosuke Ishikawa, "Straddle-type Monorail as Leading Urban Transport System for the 21st Century", Hitachi Review Vol. 48, No. 3, 1999

Railway Bureau Ministry of Land, Infrastructure,
Transport and Tourism, "*Technical
Regulatory Standards on Japanese Railways*",
March, 31, 2012

Siu. L.K, "*Innovative Lightweight Transit
Technologies for Sustainable
Transportation*", Journal of Transportation
System Engineering and Information
Technology, 2007, 7(2), 63–71.

Simon Iwnicki, "*Handbook of railway vehicle
dynamics*", Taylor & Francis Group, 2006

Takeo Kuwabara, "*New Solution for Urban
Traffic: Small-type Monorail System*", Hitachi
Review Vol. 50 (2001), No. 4.

PT. Melu Bangun Wiweka, "*Design Criteria of
MBW Monorail Guide-way*", 2012