

## Evaluasi Desain Bogie Monorel Jenis *straddle* Produksi Industri Nasional untuk Sarana Transportasi Massal Perkotaan di Indonesia

Danardono A.S.<sup>1,a</sup>, Gatot Prayogo<sup>1,b</sup>, Sugiharto<sup>1,c</sup>, Teguh Nugraha<sup>2,d</sup>, Kusnan Nuryadi<sup>2,e</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia

Kampus Baru UI Depok 16424, Jawa Barat, Indonesia

<sup>2</sup> PT. Melu Bangun Wiweka (PT. MBW) Indonesia

Jl. Simpang Tiga Setu No. 39 Tambun Bekasi 17510, Jawa Barat, Indonesia

Email: <sup>a</sup>danardon@eng.ui.ac.id, <sup>b</sup>gatot@eng.ui.ac.id, <sup>c</sup>sugih.sugiharto@unpas.ac.id, <sup>d</sup>teguh.nk@mbwpt.com, <sup>e</sup>kusnan.n@mbwpt.com

### Abstrak

Secara umum ditinjau dari bentuk konstruksinya monorel terbagi dalam dua jenis yaitu *suspended* dan *straddle*. Hingga saat ini jenis *straddle* merupakan tipe yang paling banyak digunakan untuk sarana transportasi perkotaan dunia sebagai salah satu solusi bagi permasalahan angkutan publik untuk jarak dekat dan menengah sesuai dengan konsep sistem transit sederhana dan ringan bagi mobilitas masyarakat yang berkelanjutan serta ramah lingkungan. Dalam kurun waktu lima tahun terakhir desain monorel sudah dapat dilakukan sendiri dalam industri lokal serta ditujukan untuk memenuhi kebutuhan sarana transportasi massal di beberapa perkotaan tertentu. Rancangan Monorel selain harus bisa dioperasikan secara aman, nyaman namun harus pula mampu diaplikasikan pada berbagai kondisi topografi perkotaan dengan tata ruang yang pada dasarnya tidak menyiapkan area bagi fasilitas monorel dalam sistem tata ruang transportasi massalnya. Makalah ini menjelaskan melalui analisis dan evaluasi desain terhadap dua model desain bogie monorel jenis *straddle* yang akan dipilih untuk mendukung sarana transportasi perkotaan di Indonesia. Sementara itu pemilihan jenis dan dimensi monorel tidak ikut dipaparkan dalam paper ini. Dari hasil analisis dan evaluasi didapat Monorel dengan model desain bogie dengan posisi *steering wheels* sejajar terhadap *stabilizing wheels* dapat melaju tetap stabil berkecepatan sekitar 20 km/jam saat berada dilintasan dengan radius belok sekitar 40 m.

**Kata kunci** : evaluasi desain bogie; monorel *straddle*; produk nasional; kemampuan belok

### Latar belakang

Moda transportasi umum di Indonesia jenisnya sangat beraneka ragam. Semua jenis moda ini ditujukan untuk melayani kebutuhan masyarakat akan jasa angkutan umum massal yang murah. Akan tetapi keberadaannya saat ini belum mampu menjawab tuntutan masyarakat dalam hal keamanan, kenyamanan, dan ketepatan datang dan tiba ditujuan. Akibatnya masyarakat lebih memilih angkutan pribadi yang berakibat pada naiknya volume kendaraan dijalanan. Hasil survey *The Study on Integrated Transportation Master Plan (SITRAMP)* tahun 2004, kerugian ekonomi di Jabotabek akibat kemacetan jika dinilai dalam rupiah sebesar 12.8 triliun pertahun [1].

Implementasi monorel sebagai sarana *mass rapid transit* pertama kali diusulkan oleh *Edward H. Anson* [2], dan *Hermann* [3] membuat studi kelayakan monorel sebagai sarana transportasi massal.

Monorel adalah salah satu moda transportasi berbasis rel tunggal sebagai

penuntunnya (*guide way*). Istilah ini digunakan untuk menggambarkan sistem atau kendaraan berjalan di atas balok atau *track* sebagai menuntun arah tujuan. Istilah ini berasal dari gabungan kata *mono* (tunggal) dengan *rail* (rel), dan digunakan sejak tahun 1897. 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 nomor paten 4618 tanggal 22 November 1821 [3].

Angkutan umum di Indonesia diklasifikasikan oleh *Joewono* dan *Kubota* [4], dimana monorel dimasukkan dalam klasifikasi moda *rapid transit*.

**Tabel 1.** Klasifikasi moda transportasi umum di Indonesia [4]

Klasifikasi Angkutan Umum	Jenis Moda
<i>Para transit</i>	Ojek, Bajaj, Becak, Angkutan Kota, Taksi
<i>Street transit</i>	Metromini, <i>Reguler Bus</i> , <i>Rapid Bus</i> , <i>Trolleybus</i> , <i>Streetcar</i> , <i>Trem</i>
<i>Semirapid transit</i>	<i>Light Rail Transit</i> , <i>Semirapid buses</i>
<i>Rapid transit</i>	<i>Light Rail Rapid Transit</i> , <i>Rubber-tired Monorail</i> , <i>Rubber-tired rapid Transit</i> , <i>Rail Rapid Transit</i>

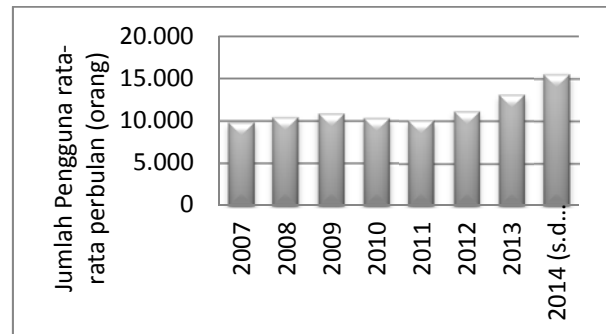
Ditinjau dari konsumsi energi yang digunakan mass rapid transit merupakan moda transportasi paling murah dan lebih ekonomis jika diaplikasikan dipertanian dengan mobilisasi massa yang besar dalam waktu yang bersamaan [5]

**Tabel 2.** Perbandingan konsumsi energi per km penumpang [5]

Jenis Moda	Kapasitas angkut (orang)	Energi per km (liter)	Energi (per km orang)	Tarif per penumpang *) (Rp/km)
Kereta/MRT	1500	3	0,002	13,00
Bus	40	0,5	0,0125	81,25
Mobil pribadi	5	0,1	0,02	130,00

\*)Asumsi harga BBM Rp 6500/liter

Pembangunan monorel sebagai fasilitas angkutan massal di beberapa kota besar di Indonesia merupakan kegiatan yang cukup beralasan, selain sebagai sarana penghematan penggunaan energi yang keberadaannya terus berkurang juga adanya kecenderungan masyarakat untuk menggunakan sarana moda transportasi massal dalam beberapa tahun terakhir yang terus meningkat.



**Gambar 1.** Jumlah pengguna KRL Jabodetabek (sumber: <http://www.bps.go.id>)

Kegiatan rancang bangun monorel di dalam negeri dimulai sejak tahun 2006, BPPT dan PT. INKA merintis kegiatan rancang bangun tersebut. Pihak swasta tidak ketinggalan dalam kegiatan ini, pada tahun 2010 PT. Melu Bangun Wiweka (MBW) mulai ikut mengembangkan desain monorel, monorel yang dikembangkan PT. MBW Indonesia saat ini sudah sampai ditahap pengujian prototipe.

Jenis monorel yang dikembangkan adalah jenis mengangkang (*straddle*), pemilihan jenis ini sangat beralasan karena jenis ini merupakan monorel yang paling banyak diaplikasikan, karena monorel jenis ini memiliki keunggulan lebih dibanding jenis lainnya. *Ishikawa* [6] seorang senior engineer dari Hitachi. Ltd, memprediksi dengan berbagai pertimbangan dan alasan, bahwa monorel jenis *straddle* akan memimpin sistem transportasi massal dimasa datang, hal ini didasarkan pada kemungkinan monorel jenis ini untuk diaplikasikan dalam berbagai jenis ukuran yang disesuaikan dengan kebutuhannya. Pernyataan ini diperkuat oleh rekannya, *Kubawara* [7], yang mengusulkan monorel jenis *straddle* tipe kecil sebagai solusi transportasi dipertanian jarak sedang, dengan alasan dan keuntungan dalam hal perbaikan lingkungan, masa pengerjaan konstruksi, dan efisiensi biaya konstruksinya. Konsep ini diperkuat oleh *Siu* [8], yang membuat analisis dari inovasi sistem transit ringan untuk mobilitas perkotaan dalam perspektif pembangunan dan perencanaan sistem transportasi yang berkelanjutan.

Hal penting yang harus diperhatikan dalam rancangan bangun monorel di Indonesia adalah bagaimana monorel harus dapat dioperasikan secara aman, nyaman dan mampu bermanuver pada berbagai kondisi topografi perkotaan di Indonesia yang pada umumnya merupakan perkotaan dimana desain tata ruangnya belum bahkan tidak menyiapkan area untuk pembangunan fasilitas monorel untuk sistem transportasi massalnya. Dalam kondisi ini sangat dimungkinkan adanya tuntutan desain yang

melebihi standar desain monorel pada umumnya. Standar desain yang perlu disiapkan dan ditingkatkan adalah: kekuatan struktur *frame* yang merupakan komponen utama bogie yang tidak boleh gagal (*failed*) pada saat dioperasikan. Saat ini kemampuan berputar/berbelok (*turning-ability*) monorel berada pada radius sekitar 60 m dan kemampuan untuk menanjaknya (*gradient-ability*) berada pada antara (5 – 6) % [9].

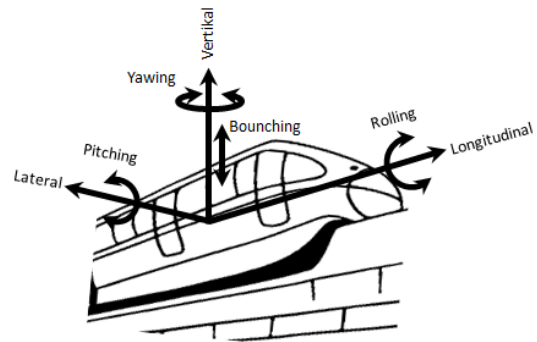
### Monorel Jenis Straddle

Monorel jenis *straddle* ditinjau dari bentuk *footprint*-nya dibagi tiga kelompok yaitu *Alweg*, *Steel Box Beam*, dan *Inverted T*. *Alweg* adalah pabrikan yang banyak menginspirasi model *footprint* bagi pabrikan lain, model *footprint Alweg* saat banyak digunakan oleh pabrikan lain seperti *Bombardier*, *Hitachi*, dan *Scomi*. *Steel box beam* adalah jenis monorel *straddle* yang umumnya menggunakan lintasan (*guide way*) dari profil baja, monorel jenis ini umumnya berukuran kecil yang banyak diaplikasikan diperkotaan untuk sarana transportasi jarak pendek atau untuk kawasan pariwisata. Monorel jenis *straddle* model *footprint inverted T* adalah jenis monorel dengan bentuk penampang *guideway* yang menyerupai huruf T terbalik. Salah satu pabrikan yang mengembangkan model ini adalah *Urbanaut*

Bogie pada monorel jenis *straddle* berfungsi sebagai tumpuan badan kereta, pada bogie tersebut ditempatkan roda traksi sebagai roda penggerak, roda kemudi sebagai pengarah gerakan, dan roda penyetabil sebagai penyangga gerak *rolling* bogie dan badan kereta. Sistem suspensi dipasang pada bogie sebagai penumpu badan kereta, selain untuk meningkatkan kenyamanan penumpang dalam kereta, suspensi berfungsi sebagai penyangga gerak *rolling*, *yawing*, *bouncing* dan *piching* badan kereta saat bergerak.



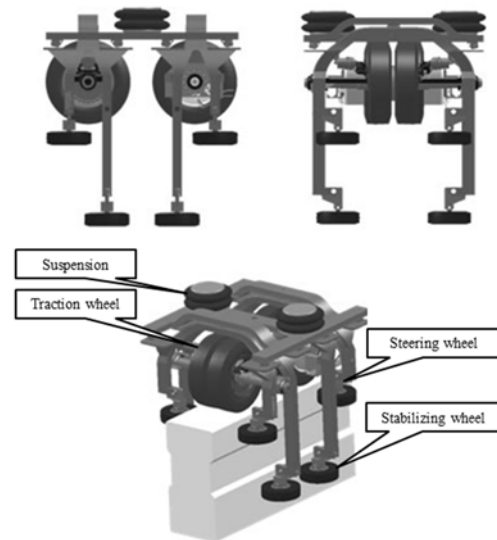
(a) *Alweg* (b) *Steel box beam* (c) *Inverted T*  
**Gambar 2.** Model *footprint* monorel jenis *straddle*  
(sumber: <http://www.monorail.org>)



**Gambar 3.** Sistem koordinat monorel

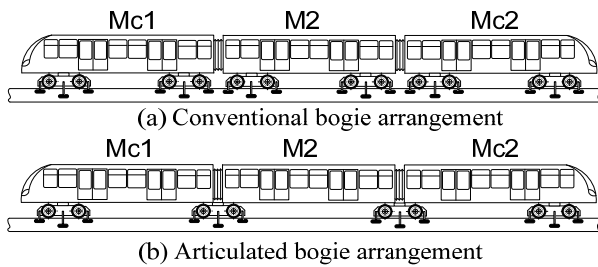
### Bogie Monorel Jenis Straddle

Konstruksi bogie monorel jenis *straddle* terdiri dari *frame* sebagai rangka bogie, roda penggerak (*traction wheels*), roda kemudi (*steering wheels*), roda penyetabil (*stabilizing wheels*), dan sistem suspensi sebagai penumpu kabin monorel (*car*).



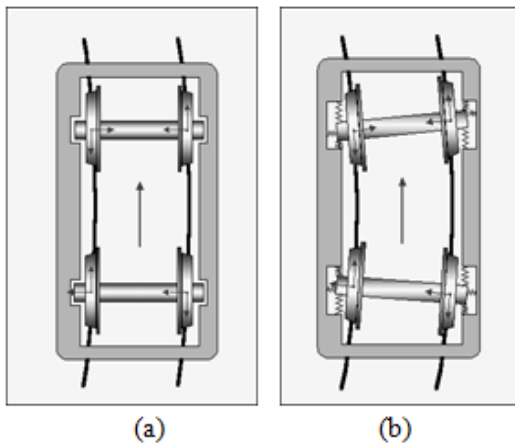
**Gambar 4.** Bogie monorel jenis *straddle*  
(sumber: <http://rollingstock.com.my>)

Pada sistem konvensional umumnya dua unit bogie dipasang pada tiap badan kereta, tetapi ada juga yang dipasang pada posisi sambungan diantara dua badan kereta (*articulated bogie*). Pemasangan bogie pada sambungan kereta dapat menurunkan radius belok yang dapat dilewati oleh rangkaian monorel tersebut. Motor penggerak umumnya menggunakan motor listrik yang ditempatkan pada masing-masing bogie yang dipasang di kereta penggerak.



**Gambar 5.** Sistem pemasangan bogie pada monorel

Konstruksi bogie 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 dengan bogie yang menggunakan poros ganda, akan tetapi kemampuan menyangga bebannya relatif lebih rendah. Saat ini kereta monorel jenis straddle umumnya menggunakan bogie dengan jenis poros ganda (*double axle*). Karena memiliki keunggulan dalam menumpu beban dan kesetabilan geraknya.



**Gambar 6.** Poros gandar pada bogie  
(a) *fixed axle bogie*, (b) *steerable axle bogie*  
(sumber: [www.railway-technical.com](http://www.railway-technical.com))

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.

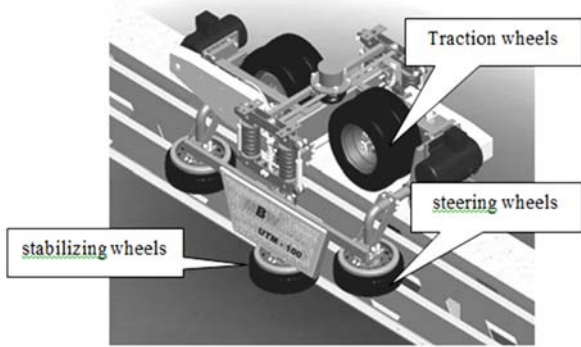
### Model Desain Bogie Monorel Produk Industri Nasional

Model desain bogie monorel produk industri nasional dalam hal ini produk PT. Melu Bangun Wiweka (MBW) didasarkan pada tiga aspek yang menjadi variabel dalam pemilihan desainnya yaitu: (1) aspek fungsional dimana bogie harus bisa diaplikasikan sebagai sarana transportasi massal diberbagai topografi perkotaan khususnya

perkotaan di Indonesia; harus mampu menopang beban seberat 24 ton dengan panjang 13.2 m, panjang sumbu antar dua bogie yang menopang kabin 8.4 m, memiliki kemampuan belok pada radius  $< R\ 60\ m$ , memiliki kemampuan menajak pada gradien  $>5\%$ ; mampu bergerak dengan kecepatan 70 km/jam pada lintasan lurus dan 20 km/jam pada lintasan belok; (2) aspek ketersediaan komponen dan material pendukung dimana keduanya harus ada di pasaran lokal; (3) aspek kemampuan manufaktur industri lokal sebagai membuatnya. Dari parameter desain diatas bogie monorel yang dirancang harus mampu menahan beban sebesar 24 ton dengan *bogie arrangement* menggunakan model konvensional. Bogie harus menahan beban yang cukup besar sehingga jenis bogie yang dipilih adalah bogie dengan poros ganda.

Proses pembuatan prototipe sudah dilakukan untuk model desain bogie generasi pertama. Spesifikasi desain model bogie desain pertama adalah sebagai berikut:

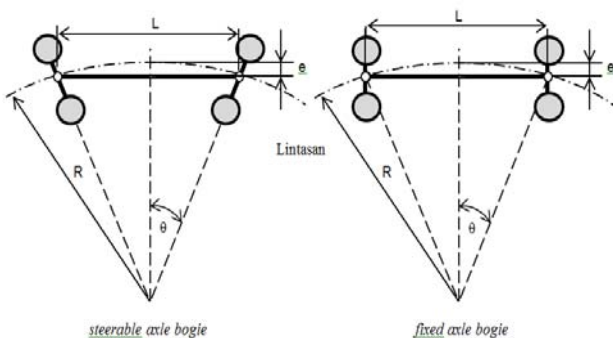
- **Distance between the center of two bogies**
  - Distance : 8400 mm
- **Type of bogie**
  - All Bogie are motored bogie (M bogie)
- **Dimension of the bogie**
  - Axle distance: 1100 mm
  - Maximum axle load at running wheel: 6 Tons
- **Maximum operation speed**
  - 70 km/h (straight track)
  - 20 km/h (curved track)
- **Acceleration and deceleration of the vehicle**
  - Acceleration : 3 km/h/s ( $0.833\ m/s^2$ )
  - Deceleration : 4.5 km/h/s ( $1.25\ m/s^2$ )
- **Running minimum curve**
  - Horizontal curve : 60 m
  - Vertical curve : 1000 m
- **Maximum gradient**
  - Maximum gradient : 5 %



**Gambar 7.** Model desain bogie model pertama

Konstruksi bogie dibuat dengan menggunakan poros ganda dimana motor penggerak ditempatkan pada tiap roda penggerak (*traction wheels*). Bogie menggunakan dua buah roda penyetabil (*stabilization wheels*) yang ditempatkan diantara roda kemudi (*steering wheels*). Suspensi yang digunakan menggunakan suspensi pegas spiral yang dilengkapi dengan peredam.

Adanya tuntutan bogie harus memiliki kemampuan belok pada radius  $< 60$  m, maka analisis dilanjutkan supaya bogie bisa memiliki kemampuan belok sesuai dengan yang diinginkan. Salah satu metoda untuk meningkatkan mampu belok adalah dengan membuat sumbu roda dengan jenis *steerable axle* atau dengan mengoptimalkan jarak sumbu dari dua poros yang digunakan. 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 luarnya, begitu pula untuk sebaliknya. Karena jarak *wheel base* roda di radius dalam lebih kecil dibanding *wheel base* roda di radius luarnya, begitu pula untuk sebaliknya. Dengan demikian mobilisasi gerak bogie saat melintasi lintasan kurvatur dapat ditingkatkan dengan membuat sumbu poros sejajar dengan jari-jari kurvatu,  $R$  (*steerable axle bogie*), atau membuat area bebas,  $e$  terhadap garis kurvatur (*fixed axle bogie*).



**Gambar 8.** Geometri belok bogie monorel

Area bebas terhadap garis lintasan kurvatur,  $e$  didefinisikan

$$e = R - R \cos \theta = R(1 - \cos \theta) \quad (1)$$

Sedangkan jarak antar dua buah poros roda kemudi (*guide wheel base*) adalah

$$L = 2R \sin \theta \quad (2)$$

dari persamaan (1) dan (2) diperoleh

$$R = \frac{e}{1 - \cos \theta} = \frac{L}{2 \sin \theta} \quad (3)$$

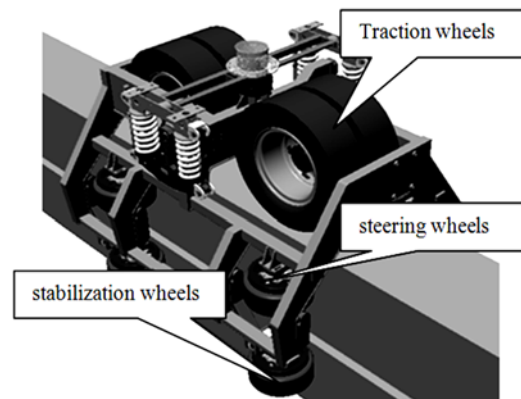
Dengan menggunakan hubungan  $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ , dengan menggunakan persamaan (3) diperoleh persamaan

$$\left(\frac{L}{2R}\right)^2 + \left(1 - \frac{e}{R}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

Dengan menggunakan persamaan (3) diperoleh hubungan antara jari-jari kurvatur,  $R$ , panjang guide wheel base,  $L$  dan area bebas terhadap lintasan kurvatur,  $e$  yang dapat didefinisikan dengan persamaan (5), dengan persamaan ini maka diperoleh hubungan geometri bogie terhadap lintasan kurvatur yang dilewatinya.

$$R = \frac{L - 4e^2}{8e} \quad (5)$$

Untuk pertimbangan kemudahan manufaktur dan efisiensi jumlah dan jenis komponen yang digunakan dipilih bogie dengan jenis *fixed axle*, akan tetapi roda penyetabil (*stabilizing wheels*) di geser menjadi sejajar dengan roda kemudi (*steering wheels*, hal ini dilakukan untuk memperbesar area bebas terhadap lintasan,  $e$  pada saat bogie melintas di lintasan kurvatur.

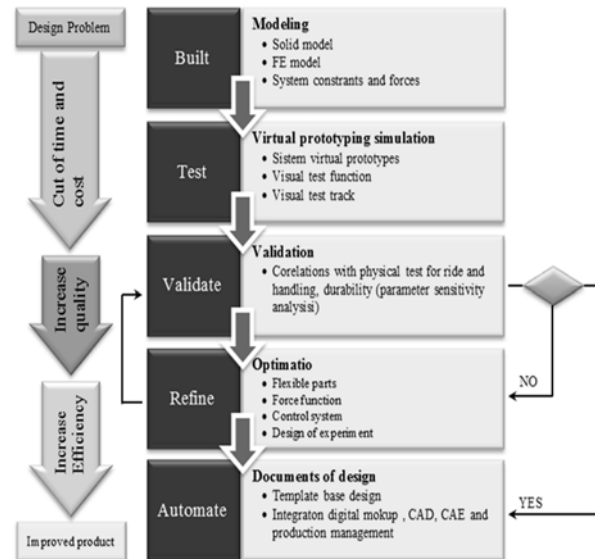


**Gambar 9.** Model desain bogie model kedua

Seluruh desain dan pengujian didasarkan pada standar yang berlaku dan umum digunakan dalam proses desain bogie monorel. Frame bogie didesain berdasarkan standar EN 13749:2011, dan sistem suspensi didasarkan pada standar JIS B2704-2, 2009, dengan Tingkat kenyamanan dirasionalisasi berdasarkan ISO 2631, 1995. Sedangkan proses manufaktur frame bogie didasarkan pada kelas FAT sambungan las yang direkomendasikan oleh IIW untuk desain kelelahannya [10].

### Metodologi

Metodologi yang dikembangkan dalam evaluasi terhadap dua model desain dilakukan dalam bentuk virtual, kegiatan ini dibagi dengan tahapan-tahapan sebagai berikut: (1) Pemodelan dan simulasi; Setiap komponen pendukung dibuat dalam bentuk *solid model*, selanjutnya setiap komponen tersebut dibentuk dalam bentuk *assembly* sesuai dengan bentuk sebenarnya. Setiap komponen didefinisikan jenis materialnya, model sambungan antar komponen yang digunakan, dan jenis dan besar gaya luar yang bekerja pada tiap komponen. (2) Selanjutnya dengan pendekatan sistem benda jamak (*multibody system*) dilakukan simulasi mulai dari aspek fungsional, perilaku dinamik tiap komponen, dan analisis gaya interaksi yang prediksi besar beban yang akan bekerja pada tiap komponen; (3) Validasi; tahapan ini adalah tahapan dimana hasil simulasi dibandingkan persyaratan/variabel desain atau standar yang sudah ditentukan diawal; (5) Optimasi; tahap ini adalah tahap pendefinisian dalam penentuan kesesuaian dari hasil analisis dengan data yang diinginkan dalam variabel desain atau standar desain yang dipilih. Pendefinisian didasarkan pada hasil analisis kekuatan dan kekuatan lelah (*fatigue strength*) yang diperoleh secara numerik (*finite element*), selanjutnya dikomparasi dengan jenis material dan ukuran geometri yang digunakan; (6) Dokumentasi; tahapan ini adalah tahapan dokumentasi hasil analisis yang sudah dikomparasi persyaratan dalam variabel desain yang diinginkan. Dokumentasi ini terdiri dari geometri hasil desain dan jenis material yang digunakan yang merupakan dasar dalam pembuatan gambar teknik dan detailnya sebagai dasar pabrikasi dari seluruh desain yang sudah dilakukan.



Gambar 10. Metode evaluasi desain

Dari hasil pendefinisian konsep desain diperoleh satu model desain yang perlu dikaji lebih lanjut apakah model tersebut akan langsung digunakan atau perlu pengembangan berikutnya, analisis yang dimaksud adalah simulasi. Simulasi digunakan untuk melihat perilaku kerja tiap komponen yang dianalisis selama menjalankan fungsinya (*multibody system*), apakah komponen yang dirancang sudah bekerja sesuai dengan fungsinya atau masih perlu perbaikan baik jenis, ukuran, dan geometrinya, analisis ini digunakan juga untuk mendefinisikan besar gaya interaksi yang terjadi pada tiap komponen yang dianalisis. Selain untuk melihat perilaku kerja komponen dan pendefinisian gaya interaksinya, simulasi digunakan juga kondisi masing-masing komponen akibat pengaruh gaya luar yang diberikan dan gaya interaksi yang terjadi. Tinjauan berupa analisis, regangan, tegangan, faktor keamanan, dan kekuatan lelahnya. Hal ini berhubungan dengan jenis material yang digunakan, apakah material yang digunakan sudah sesuai dengan kondisi pembebanan atau perlu dilakukan perubahan dari material yang digunakannya.

Simulasi untuk melihat perilaku kerja komponen (*multibody*) jika dilakukan dengan cara analitik diawali dengan penyusunan persamaan gerak. Analisis diawali dengan pembuatan persamaan gerak dari lintasan yang akan dilalui oleh monorel dimana dalam analisis ini digunakan metode elemen hingga, lintasan (*guideway*) yang dibebani monorel yang sedang melintas diasumsikan sebagai batang kaku dengan tumpuan tetap, persamaan gerak dari lintasan dimodelkan sebagai berikut

$$m_T \ddot{u}_T + c_T \dot{u}_T + k_T u_T = F_T(t) \quad (6)$$

Dimana  $m_T$  adalah massalintasan,  $c_T$  adalah konstanta peredaman,  $k_T$  adalah konstanta kekakuan dan  $F_T(t)$  adalah gaya interaksi antara monorel dengan lintasan, sedangkan  $\ddot{u}_T$ ,  $\dot{u}_T$  dan  $u_T$  adalah vektor percepatan, kecepatan dan perpindahan yang terjadi pada struktur lintasan. Persamaan gerak monorel disusun dari analisis orientasi gerakan tiap komponen yang menggambarkan derajat kebebasannya (DOF). Orientasi gerakan didefinisikan dari model dinamik sistem yang dianalisis. Monorel yang dianalisis dimodelkan memiliki derajat kebebasan 15 DOF. Bentuk umum persamaan gerak monorel adalah:

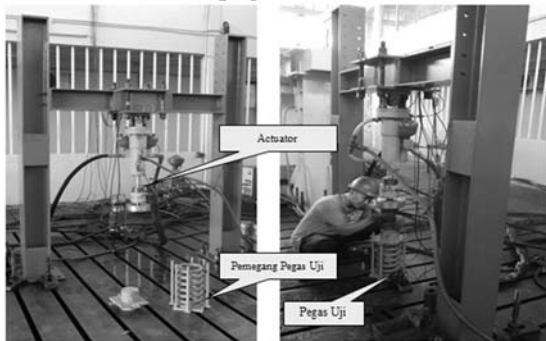
$$m_{vi}\ddot{u} + c_{vj}\dot{u} + k_{vj}u = F_v(t) \quad (7)$$

dimana  $m_{vi}$  ( $i=1,2,3$ ) merupakan massa dari *body* dan bogie,  $k_{vj}$  dan  $c_{vj}$  ( $j=1,2,3,4$ ) kekakuan dan redaman suspensi bogie dan  $F_v(t)$  adalah gaya interaksi antara lintasan dengan monorel. Beban interaksi antara monorel dengan lintasan dimodelkan sebagai rangkaian beban yang berjalan maka vektor gaya  $F(t)$  adalah:

$$F(t) = \sum_{i=1}^n y_j(t)F_{Gj} \quad (8)$$

dimana  $y_j$  dan  $F_{Gj}$  adalah vector perpindahan dan gaya relatif antara roda traksi dengan lintasan.

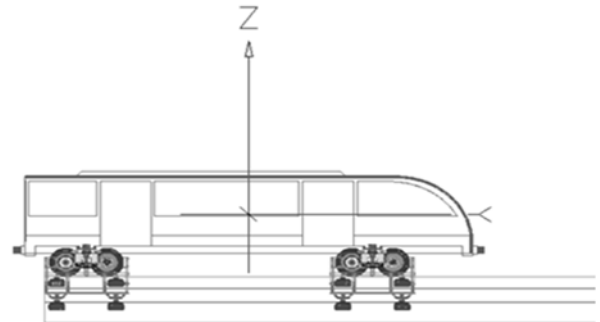
Sebelum analisis dilakukan tiap karakteristik komponen didefinisikan diawal seperti massa, konstanta kekakuan, konstanta redaman, besar dan arah gaya luar yang bekerja. Ada beberapa karakteristik komponen yang diperoleh dengan pengujian salah satunya adalah konstanta kekakuan pegas yang digunakan pada sistem suspensi. Hasil pengujian diperoleh harga konstanta kekakuan pegas sebesar 268.20 N/mm.



**Gambar 11.** Pengujian statik pegas dengan standar JIS B2704

Simulasi untuk melihat perilaku kerja komponen (*multibody*) saat ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Simwise 4D*, metode dinamika benda jamak (*multibody*) yang digunakan oleh perangkat lunak ini dimana setiap komponen pendukung didefinisikan mulai dari

ukuran geometri, jenis material, jenis sambungan antar komponen, gaya luar, sistem penggerak dan model kontak antara roda dengan lintasanya

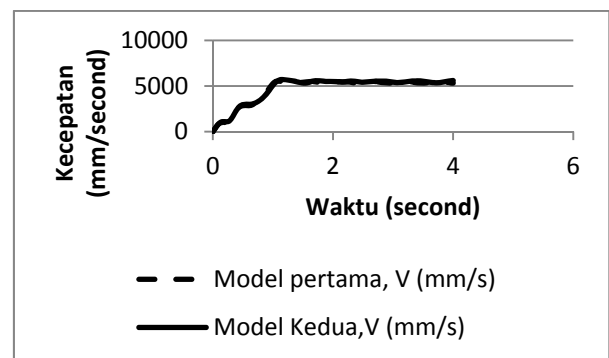


**Gambar 12.** Pemodelan dengan Simwise 4D

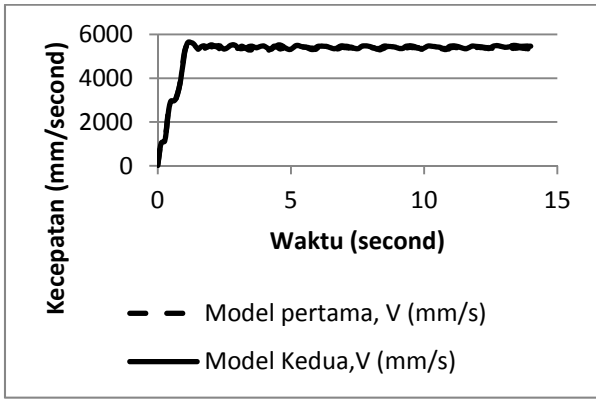
### Hasil dan Analisis

Dalam paper ini hasil analisis baru sampai tahapan analisis perilaku gerak dan prediksi besar gaya interaksi yang terjadi pada komponen-komponen kritis, analisis kekuatan dan kelelahan struktur pada komponen belum dilakukan dan akan disajikan pada paper berikutnya.

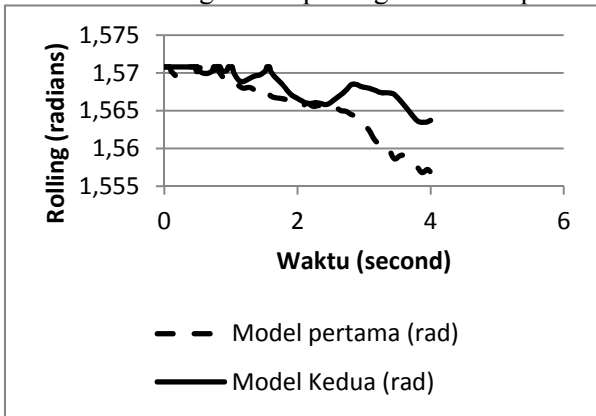
Hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik kecepatan, orientasi dan gaya interaksi yang terjadi dari dua model desain yang sedang dievaluasi.



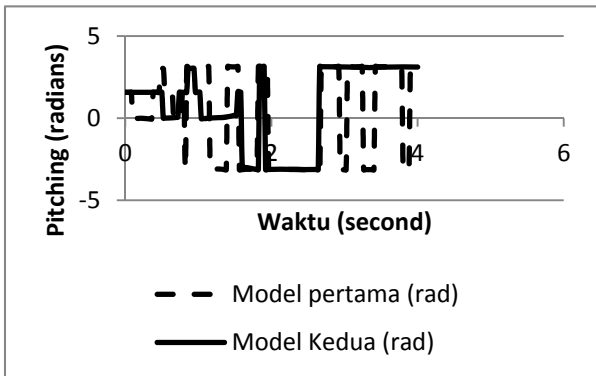
**Gambar 13.** Kecepatan pada lintasan lurus dengan kecepatan gerak 20 kmph



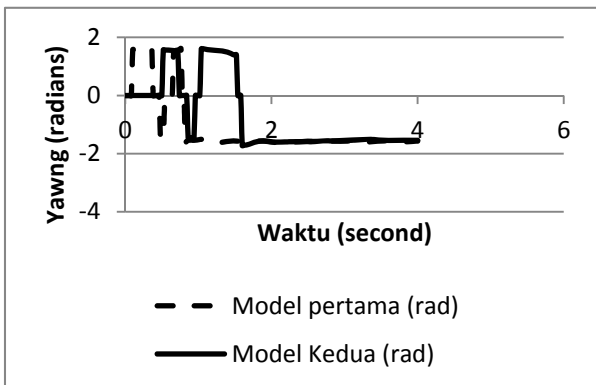
**Gambar 14.** Kecepatan pada lintasan belok pada  $R=40$  m dengan kecepatan gerak 20 kmph



(a) Gerak rolling

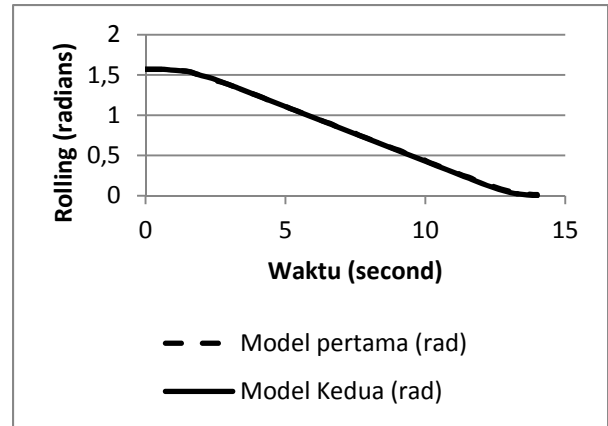


(b) Gerak pitching

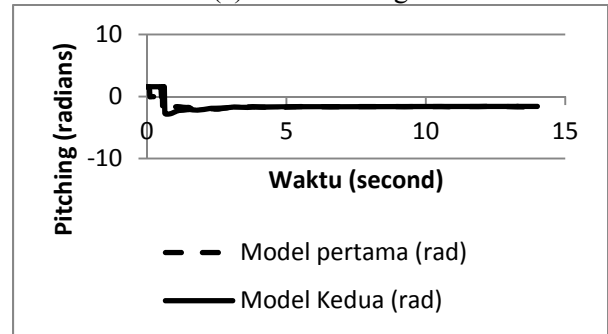


(c) Gerak yawing

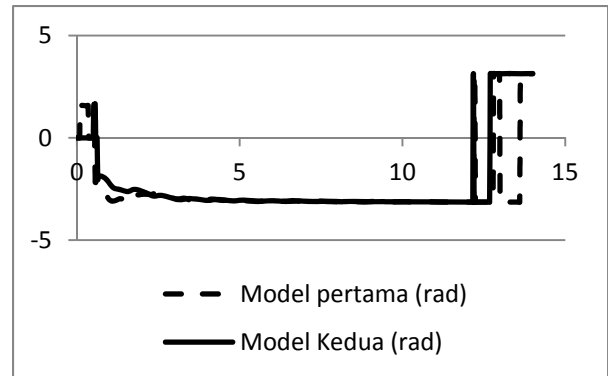
**Gambar 15.** Orientasi gerak kabin monorel pada lintasan lurus dengan kecepatan gerak 20 kmph



(a) Gerak rolling

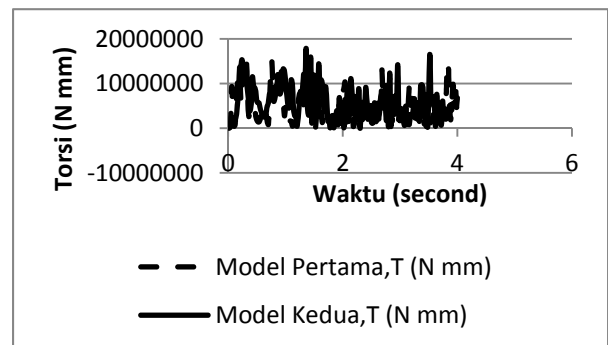


(b) Gerak pitching



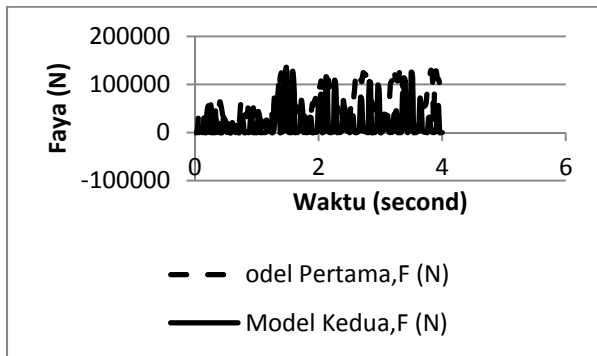
(c) Gerak yawing

**Gambar 16.** Orientasi gerak kabin monorel pada lintasan belok pada  $R=40$  m dengan kecepatan gerak 20 kmph

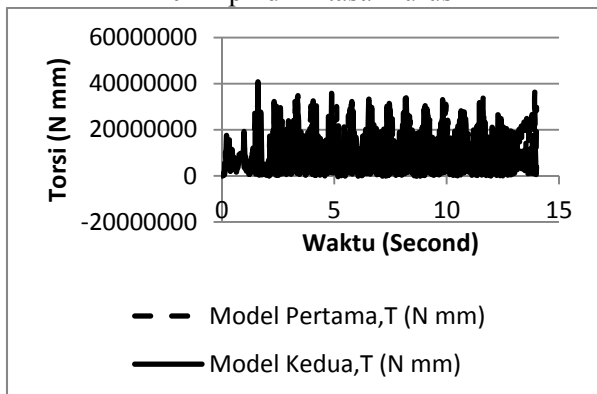


**Gambar 17.** Torsi roda pada penggerak 1 bogie depan dengan kecepatan gerak 20 kmph di lintasan lurus

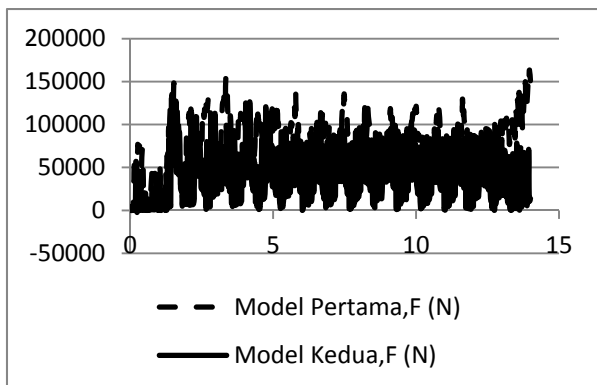




**Gambar 18.** Gaya interaksi pada poros roda penggerak 1 bogie depan dengan kecepatan gerak 20 kmph di lintasan lurus



**Gambar 19.** Torsi pada roda penggerak 1 pada bogie depan di lintasan belok pada  $R=40$  m dengan kecepatan gerak 20 kmph



**Gambar 20.** Gaya interaksi pada poros roda penggerak 1 pada bogie depan di lintasan belok pada  $R=40$  m dengan kecepatan gerak 20 kmph

Dari hasil simulasi terhadap dua model bogie pada kondisi lintasan lurus dan lintasan belok di radius  $R=40$  m pada kecepatan 20 kmph menunjukkan kedua model memiliki keidentikan dalam respon dinamik, maupun gaya interaksinya.

Orientasi gerak, gerak *rolling* pada posisi lintasan lurus model pertama memiliki orientasi gerak yang lebih besar dibanding model kedua, sedangkan pada lintasan belok harpir tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Untuk gerak *pitching* pada lintasan lurus model pertama memiliki siklus yang lebih banyak

dibanding model kedua dengan waktu orientasi yang lebih cepat, kondisi ini tidak terjadi pada lintasan belok. Sedangkan pada gerak *yawing* pada kondisi lintasan lurus maupun belok siklus orientasi menunjukan keidentikan akan tetapi waktu siklus model pertama lebih cepat dibanding model kedua.

Besar torsi yang terjadi pada lintasan lurus memiliki karakteristik yang sama baik model pertama maupun model kedua, hal yang sama terjadi pada lintasan belok.

Gaya interaksi yang terjadi baik kondisi lurus maupun belok, gaya yang terjadi pada poros roda penggerak baik pentuk pertama maupun kedua memiliki bentuk stokastik dimana gaya yang terjadi pada model pertama relatif lebih besar dibanding gaya yang terjadi pada model kedua.

### Kesimpulan

Dari hasil analisis yang sudah dilakukan terhadap dua model desain bogie yang sedang dikembangkan dapat ditarik kesimpulan awal sebagai bahan evaluasi sebagai berikut:

- Respon dinamik kedua model bogie relatif identik pada kondisi pembebanan yang sama.
- Pada lintasan lurus model pertama memiliki hambatan gerak relatif lebih kecil dibanding model kedua, hal ini bisa disiasati dengan menggunakan sistem pengendali kontak antara roda kemudi, dan roda penyetabil dengan permukaan lintasannya.
- Gaya interaksi yang terjadi pada model pertama dan kedua baik pada lintasan lurus maupun lintasan memiliki bentuk stokastik, sehingga penilaikan kekuatan lelah komponen harus dievaluasi pada  $10^4$ - $10^9$  siklus pembebanan [10].

### Ucapan Terima kasih

Ucapan terima kasih kami sampaikan 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 mendukung dan memberi dana penelitian ini melalui Hibah Penelitian Riset Andalan Perguruan Tinggi (RAPID) tahun 2014.

## Referensi

- [1] Zulkifli Aboebakar, Tantangan dan peluang monorel sebagai program pengembangan pola transportasi makro (PTM) DKI Jakarta, *Lex Journalica* Vol. 5 No. 1 Desember 2007.
- [2] Edward H. Anson, “Monorail system for mass rapid transit”, Gibb & Hill, Inc. Consulting Engineer, New-York, April 1954
- [3] Hermann, The feasibility of monorail, Master Theses Civil Engineering Department at Massachusetts Institute of Technology, September 1959 .
- [4] Joewono and Kubota, The characteristics of paratransit and non-motorized transport in Bandung, Indonesia, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 262 - 277, 2005
- [5] Kementrian Perhubungan RI, Rencana induk perkeretaapian nasional, Direktorat Jenderal Perkeretaapian, April 2011.
- [6] Kosuke Ishikawa, Akira Ohazama, Hiromasa Sora, Taketoshi Sekitani, Straddle-type monorail as a leading urban transport system for the 21<sup>st</sup> century, *Hitachi Review*, 48(3) (1999) 149.
- [7] Kuwabara, T., Hiraishi, M., Goda, K., Okamoto, S., Ito, A., & Sugita, Y., New solution for urban traffic: small-type monorail system, *Hitachi Review*, 50(4) (2001) 139.
- [8] Siu. L.K., Innovative lightweight transit technologies for sustainable transportation, *Journal of Transportation System Eng. and Information Technology*, 7(2) (2007) 63–70.
- [9] Amin Tarighi, Multi-criteria feasibility assessment of the monorail transportation system in Metu campus, A thesis submitted to the gradate school of natural and applied science of Middle East Technical University, Januari, 2011
- [10] D Radaj, *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*, Second edition 2006, Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC