

Perancangan dan Pengembangan Bogie Monorel : Analisa Respon Dinamik dan Tingkat Kenyamanan

Gatot Prayogo, Danardono A.S, Riduan Akbar Siregar, Sugiharto

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, 16424
e-mail: gatot@eng.ui.ac.id ; riduan.akbar@ui.ac.id

Abstrak

Dalam penelitian ini objek yang dikaji adalah model baru *bogie* monorel tipe UTM 125 dengan menggunakan sistem suspensi tipe suspended, hasil rancangan dan produk nasional. Tujuan dari penelitian ini secara umum adalah untuk menganalisa karakteristik respon dinamik dari monorel dan secara khusus adalah untuk mengevaluasi tingkat kenyamanannya. Analisis dan simulasi numerik gerak gerbang monorel dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Simwise4D. Penentuan tingkat kenyamanan gerbang monorel berdasarkan pada standar EN 12299:2009 dengan menggunakan metode *Continous Comfort*. Dari hasil analisa diketahui bahwa nilai percepatan arah vertical paling besar terjadi pada bagian belakang struktur *carbody*, sedangkan percepatan arah lateral terbesar terjadi pada bagian depan struktur *carbody*. Secara umum dapat disimpulkan bahwa tingkat kenyamanannya masih dalam kategori tidak nyaman (*discomfort*) sehingga diperlukan penyempurnaan lebih lanjut.

Kata kunci: monorel, bogie, karakteristik respon dinamik, analisis dan simulasi dinamik.

Pendahuluan

Permasalahan lalu lintas transportasi darat seperti kecelakaan dan kemacetan yang melibatkan kendaraan bermotor telah menjadi permasalahan utama dalam skala nasional yang banyak terjadi di kota-kota besar di Indonesia yang pada gilirannya mengakibatkan pertumbuhan kota menjadi tidak efisien dan berdampak pada kehilangan jiwa dan kerugian ekonomi yang tidak sedikit. Rasio infrastruktur transportasi dengan luas lahan yang cenderung rendah, jaringan jalan kendaraan dan pejalan kaki yang tidak memadai, tata ruang kota yang tidak terkendali, pertumbuhan kendaraan yang sangat tinggi, dan pelayanan angkutan umum yang tidak memadai menjadi sumber terjadinya kemacetan di kota-kota besar Indonesia [1].

Berdasarkan proposal pemecahan kemacetan di jalan protokol Jakarta yang disampaikan oleh konsorsium BUMN, moda transportasi massal paling menjanjikan untuk mengurangi permasalahan kemacetan adalah dengan membangun sarana dan prasana moda transportasi monorel [2].

Dasar pertimbangan pemilihan moda transportasi ini dibandingkan dengan moda transportasi massal lain diantaranya adalah prasarananya dari monorel relatif tidak memerlukan pembebasan lahan yang tidak banyak, mampu menjangkau seluruh tempat di perkotaan, kapasitas angkut yang besar, nilai investasi yang terjangkau, waktu tempuh yang terjamin, tidak ada perlintasan sebidang dan ramah lingkungan.

Untuk mewujudkan hal ini dibutuhkan perancangan dan pengembangan dari struktur dan *bogie* dari monorel harus memiliki tiga aspek utama yang dibutuhkan dalam setiap moda transportasi, yaitu keselamatan (*safety*), kehandalan (*reliable*) dan kenyamanan (*comfort*). *Bogie* sebagai struktur rangka yang menjadi tumpuan untuk sistem penggerak, sistem suspensi, dan struktur *carbody* merupakan bagian paling penting yang menentukan stabilitas dinamik dari monorel. Objek yang diinvestigasi pada penelitian ini adalah model *bogie* monorel tipe UTM 125 yang rancangan awalnya (*preliminary design*) oleh PT. Melu Bangun Wiweka (MBW). Tujuan dari penelitian ini secara umum adalah untuk menganalisa karakteristik respon dinamik dari monorel dan secara khusus adalah untuk mengevaluasi tingkat kenyamanan dari monorel menggunakan *bogie* UTM 125.

Metoda Penelitian

Persiapan penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data-data spesifikasi teknis dari struktur sarana monorel UTM 125 NG berupa parameter dinamik struktur monorel yang meliputi massa (*m*), konstanta pegas (*k*) dan konstanta peredaman (*c*) dari struktur monorel [3,4] yang ditunjukkan tabel 3. Kemudian mengumpulkan data properti material [5,6] dari struktur sarana monorel (tabel 2) dengan jenis material yang digunakan adalah material baja karbon JIS G3101;SS400, JIS G3106;SM 490 B, JIS G4051;S45C dan JIS G4051;S35C. Dilakukan juga

studi pada aplikasi CAD (*Computer Aided Design*) dengan menggunakan program SolidWorks dan aplikasi CAE (*Computer Aided Engineering*) dengan menggunakan program Simwise 4D. Validasi terhadap model CAD dalam format *file* SolidWorks juga dilakukan untuk memastikan struktur *bogie* monorel yang akan dianalisa sudah mencakup seluruh struktur yang penting dan sudah terpisahkan dari bagian-bagian lainnya yang tidak diperlukan untuk dianalisa, dan sudah diperiksa terhadap kesalahan-kesalahan pemodelan saat mendesain dengan SolidWorks (*clean-up errors*). Penyederhanaan, pemodelan ulang (*re-modeling*) dan perakitan ulang (*re-assembling*) dilakukan pada beberapa bagian dari model *bogie* monorel untuk menghilangkan bagian yang tumpang tindih (*interferencing*) dan tidak terdefinisi dengan baik (*under-defined*) sehingga didapat model yang bebas tumpang tindih (*no-interferences*), dan terdefinisi seluruhnya (*fully-defined*), dan dengan demikian model dapat digunakan secara optimal untuk keperluan analisa dinamik *bogie* monorel. Analisis karakteristik respon dinamik dilakukan dengan membuat model matematis persamaan gerak dari *carbody* dan *bogie* yang modelnya berasal dari *file* CAD Solidworks.

Sedangkan untuk perhitungan numerik dan simulasi dinamik dari struktur monorel menggunakan perangkat lunak Simwise 4D.

Tabel 1. Parameter dinamik struktur monorel UTM 125 NG [3,4”]

Parameter	Simbol	Nilai
1. Massa (kg)		
Massa <i>carbody</i> (<i>full load</i>)	m_{v1}	20000
Massa <i>bogie</i>	m_{v2}, m_{v3}	2100
2. Konstanta pegas (N/m)		
Bogie ke <i>carbody</i> (vertikal)	k_{vv1}	387000
Bogie ke <i>carbody</i> (lateral)	k_{vh1}	387000
Roda traksi ke <i>track</i> ”	k_{vv2}	394000
Roda pengarah ke <i>track</i> ”	k_{vh2}	182400
Roda penyeimbang ke <i>track</i> ”	k_{vh2}	182400
3. Konstanta peredaman (Ns/m)		
Bogie ke <i>carbody</i> (vertikal)	c_{vv1}	1500
Bogie ke <i>carbody</i> (lateral)	c_{vh1}	1500
Roda traksi ke <i>track</i> ”	c_{vv2}	2500
Roda pengarah ke <i>track</i> ”	c_{vh2}	800
Roda penyeimbang ke <i>track</i> ”	c_{vh2}	800

Tabel 2. Properti material pada struktur monorel UTM 125 NG [5,6]

Jenis Material	mass density (kg/m ³)	Elastic Modulus (MPa)	Poison Ratio	Tensile Strength (MPa)
JIS				
G 3101; SS 400	7800	2,00E+05	0,26	400
G 3106; SM 490 B	7800	2,10E+05	0,28	490
G 4105; S 35 C	7800	2,10E+05	0,28	700
G 4105; S 45 C	7800	2,10E+05	0,28	750

Nilai parameter dan properti material seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. dan Tabel 2. kemudian dimasukan ke dalam *material properties* Simwise 4D, dan didefinisikan ke bagian-bagian struktur *bogie*. Dari tiap bagian komponen kemudian didefinisikan sifat sambungan *contact* dan *joint* antar komponen dalam *bogie*, antara *bogie* dengan *carbody* dan antara *bogie* dengan *track*. Setelah nilai parameter dan derajat kebebasan tiap komponen telah terdefinisi, selanjutnya dilakukan pengukuran respon dinamik (vektor posisi, kecepatan, percepatan linier atau sudut dan gaya kontak), dimana pengukuran yang dilakukan sesuai dengan standar EN 12299:2009 [7]. Dalam tahap *simulation settings* pemilihan waktu integrasi (*step time*) yang dipilih adalah sebesar 0,01 s dan metode Runge-Kutta-Merson digunakan untuk memperoleh solusi dari persamaan gerak untuk keseluruhan sistem struktur monorel. Data hasil perhitungan numerik yang dihasilkan dalam simulasi adalah berupa vektor respon dinamik terhadap waktu.

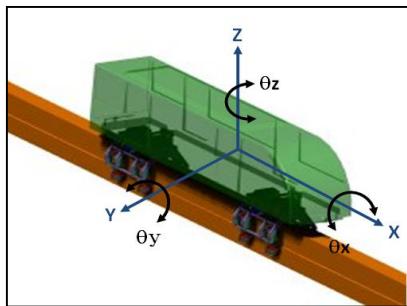
Dimana hasil perhitungan respon dinamik tersebut dapat dilihat secara visual berupa animasi gerakan 3D dan di plot dalam bentuk angka ataupun grafik. Hasil ini kemudian dievaluasi dengan menggunakan metode *Continuous Comfort* sesuai dengan standar EN 12299:2009 untuk mengetahui tingkat kenyamanan dari gerak struktur monorel yang dihasilkan terhadap penumpang.

Idealisasi

Dalam analisa respon dinamik, diperlukan idealisasi untuk menyederhanakan kondisi fisik yang sesungguhnya dari monorel menjadi bentuk diagram benda bebas sebagai dasar pemikiran dari perancang. Dalam penyederhanaan yang dilakukan, struktur keseluruhan monorel dibagi menjadi dua bagian, yaitu struktur atas dan struktur bawah. Struktur atas terdiri dari struktur sarana monorel sedangkan struktur bawah terdiri dari *track* monorel. Dalam analisis gerak sarana monorel diasumsikan gerak longitudinal dari sarana monorel diabaikan, monorel bergerak dengan kecepatan konstan dan kontak antara roda dengan jalur selalu tetap. Sedangkan *track* monorel diasumsikan sebagai batang kaku (*rigid beam*).

Model Sarana Monorel

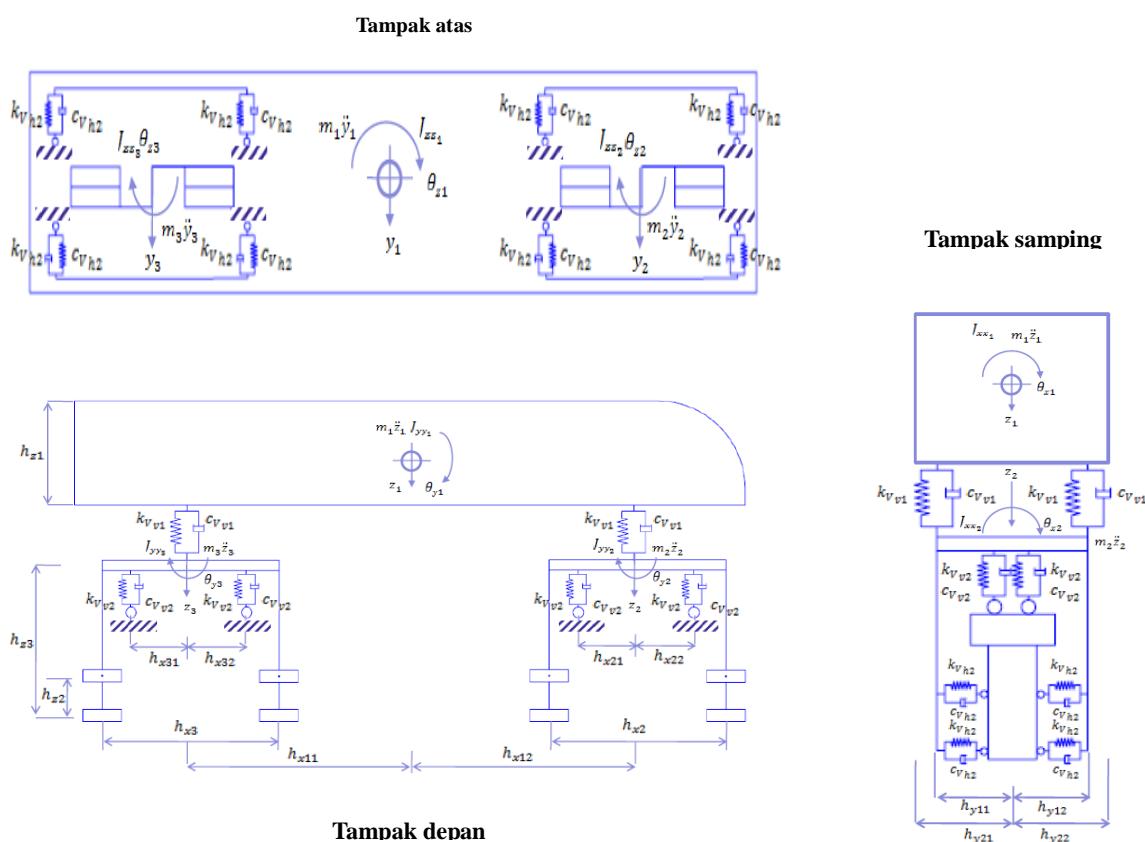
Sarana monorel yang diidealisasikan memiliki 15 DOF untuk merepresentasikan respon dinamiknya. Sistem dinamik dari struktur sarana monorel yang digunakan mengadopsi referensi [8-10].



Gambar 1. Derajat kebebasan struktur sarana monorel UTM 125

Berdasarkan gambar di atas struktur sarana monorel diasumsikan sebagai benda kaku (*rigid body*). Dalam pemodelan, struktur sarana monorel terdiri dari *carbody* dan dua *bogie*. Massa dari *carbody* ditumpu oleh susunan pegas primer serta *dashpot* vertikal dan horizontal (k_{V1} , k_{Vh1} , c_{V1} , c_{Vh1}) yang terhubung langsung dengan *bogie* bagian depan dan *bogie* bagian belakang.

Sedangkan massa *bogie* ditumpu oleh roda traksi (kv_{v2} , cv_{v2}) dan dijepit oleh roda pengarah dan roda penyeimbang pada kedua sisi *bogie* (kv_{h2} , cv_{h2}). Struktur carbody dan bogie masing – masing memiliki 5 DOF yang terdiri dari gerak arah vertikal (V_z), gerak arah lateral (V_y), gerak rotasi di sumbu longitudinal (θ_{vx}), gerak rotasi di sumbu lateral (θ_{vy}) dan gerak rotasi di sumbu vertikal (θ_{vz}) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. dan notasi yang digunakan dalam persamaan gerak ditunjukkan pada Tabel 3. Untuk memudahkan dalam penyusunan persamaan gerak, maka model dari struktur sarana monorel dapat diidealisasikan menjadi model diagram benda bebas yang bergerak dalam bidang planar (Gambar 2).



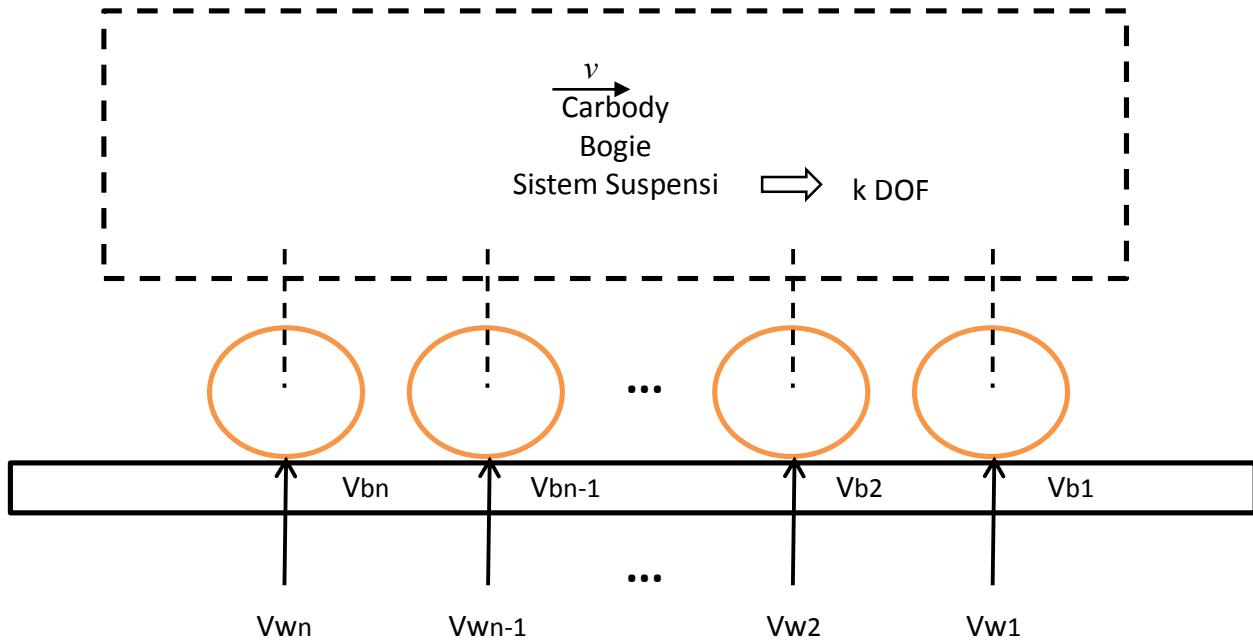
Gambar 2. Idealisasi diagram benda bebas dari struktur monorel.

Tabel 3. Data notasi persamaan gerak struktur monorel UTM 125 NG

Parameter	Simbol	Unit
1. Massa <i>Carbody</i> dan <i>Track</i> <i>Bogie</i> As roda traksi	$m_{v1} m_b$ m_{v2}, m_{v3} $m_{vw1}, m_{vw2}, m_{vw3}, m_{vw4}$	[kg] [kg] [kg]
2. Inersia <i>Carbody</i> (koordinat x, y, z) <i>Bogie</i> (koordinat x, y, z)	$I_{vx1}, I_{vy1}, I_{vz1}$ $I_{vx2}, I_{vy2}, I_{vz2}$ $I_{vx3}, I_{vy3}, I_{vz3}$	[kgm ²] [kgm ²] [kgm ²]
3. Vektor percepatan translasi <i>Carbody</i> (lateral dan vertikal) <i>Bogie</i> (lateral dan vertikal)	$\ddot{V}_{y1}, \ddot{V}_{z1}$ $\ddot{V}_{y2}, \ddot{V}_{y3}, \ddot{V}_{z2}, \ddot{V}_{z3}$	[m/s ²] [m/s ²]
4. Vektor percepatan sudut <i>Carbody</i> (logitudinal, lateral dan vertikal) <i>Bogie</i> (logitudinal, lateral dan vertikal)	$\ddot{\theta}_{vx1}, \ddot{\theta}_{vy1}, \ddot{\theta}_{vz1}$ $\ddot{\theta}_{vx2}, \ddot{\theta}_{vy2}, \ddot{\theta}_{vz2},$ $\ddot{\theta}_{vx3}, \ddot{\theta}_{vy3}, \ddot{\theta}_{vz3}$	[rad/s ²] [rad/s ²] [rad/s ²]
5. Vektor percepatan translasi <i>Carbody</i> (lateral dan vertikal) <i>Bogie</i> (lateral dan vertikal)	$\dot{V}_{y_{v1}}, \dot{V}_{z_{v1}}$ $\dot{V}_{y_{v2}}, \dot{V}_{y_{v3}}, \dot{V}_{z_{v2}}, \dot{V}_{z_{v3}}$	[m/s] [m/s]
6. Vektor kecepatan sudut <i>Carbody</i> (logitudinal, lateral dan vertikal) <i>Bogie</i> (logitudinal, lateral dan vertikal)	$\dot{\theta}_{vx1}, \dot{\theta}_{vy1}, \dot{\theta}_{vz1}$ $\dot{\theta}_{vx2}, \dot{\theta}_{vy2}, \dot{\theta}_{vz2},$ $\dot{\theta}_{vx3}, \dot{\theta}_{vy3}, \dot{\theta}_{vz3}$	[rad/s] [rad/s] [rad/s]
7. Vektor posisi gerak translasi <i>Carbody</i> (lateral dan vertikal) <i>Bogie</i> (lateral dan vertikal)	V_{y1}, V_{z1} $V_{y2}, V_{z2}, V_{y3}, V_{z3}$	[m] [m]
8. Vektor posisi gerak rotasi <i>Carbody</i> (<i>rolling, pitching</i> dan <i>yawing</i>) <i>Bogie</i> (<i>rolling, pitching</i> dan <i>yawing</i>)	$\theta_{vx1}, \theta_{vy1}, \theta_{vz1}$ $\theta_{vx2}, \theta_{vy2}, \theta_{vz2}$ $\theta_{x3}, \theta_{y3}, \theta_{z3}$	[rad] [rad] [rad]
Dimensi carbody Jarak antara sistem suspensi <i>bogie</i> depan dan <i>bogie</i> belakang ke titik berat <i>carbody</i>	h_{1ui}, h_{1uj}	[m]
Dimensi bogie (m) Jarak antara roda traksi depan dan belakang ke titik berat <i>bogie</i>	$h_{2ui}, h_{2uj}, h_{3ui}, h_{3uj}$	[m]

Model beban interaksi roda dengan track

Berdasarkan diagram benda bebas di atas, monorel yang memiliki k DOF, seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema ilustrasi dari interaksi antara monorel dengan *track*.

Matriks sistem monorel ditunjukkan dengan vektor $\{d_v\}$ dimana tiap kontak roda yang terdiri dari n roda memiliki satu DOF sehingga kontak dari tiap roda yang direpresentasikan dengan vektor $\{d_w\} = \{V_{w1}, V_{w2} \dots V_{wn}\}^T$, dimana V_{wn} menunjukkan vektor posisi gerak dari tiap kontak roda. Bersamaan dengan itu terdapat n titik kontak pada *track* yang direpresentasikan dengan vektor $\{d_b\} = \{V_{b1}, V_{b2} \dots V_{bn}\}^T$, dimana V_{bn} adalah sebagai vektor posisi *track* pada tiap kontak dengan roda. Jika $[M_v]$, $[c_v]$, dan $[k_v]$ secara berurutan adalah matriks dari massa, konstanta peredaman dan konstanta kekakuan dari monorel, dan $\{d_v\}$ adalah vektor posisi dari monorel, yaitu $\{d_v\} = \{d_v\} \{d_w\}^T$, maka bentuk umum dari persamaan gerak dari sarana monorel adalah:

$$[M_v]\{\ddot{d}_v\} + [c_v]\{\dot{d}_v\} + [k_v]\{d_v\} = \{F_v\} \quad (1)$$

Dimana $\{F_v\}$ adalah vektor gaya yang terdiri dari gaya eksternal dan gaya interaksi antara roda sarana monorel dengan *track*. Menurut Yang dan Wu [11] analisa dari sistem interaksi antara monorel dengan *track* terkait dengan perubahan posisi sarana monorel terhadap waktu. Diasumsikan seluruh informasi tentang sistem pada

waktu t diketahui dan Δt waktu integrasi pada setiap perubahan posisi. Jika perilaku dari gerak monorel dianalisa pada setiap $t + \Delta t$, maka Pers. 1. dapat dituliskembali dengan menyertakan perubahan terhadap waktu dengan matriks sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} [M_{vv}] & [M_{vw}] \\ [M_{wv}] & [M_{ww}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{\ddot{d}_v\} \\ \{\ddot{d}_w\} \end{pmatrix}_{t+\Delta t} + \begin{pmatrix} [c_{vv}] & [c_{vw}] \\ [c_{wv}] & [c_{ww}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{\dot{d}_v\} \\ \{\dot{d}_w\} \end{pmatrix}_{t+\Delta t} + \\ \begin{pmatrix} [k_{vv}] & [k_{vw}] \\ [k_{wv}] & [k_{ww}] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \{d_v\} \\ \{d_w\} \end{pmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{pmatrix} \{F_{ve}\} \\ \{F_{we}\} \end{pmatrix}_{t+\Delta t} \end{aligned} \quad (2)$$

Dimana notasi matriks $[u_{vv}]$, $[u_{vw}]/[u_{ww}]$ dan $[u_{ww}]$ secara berurutan adalah matriks sistem monorel (terdiri dari *carbody*, *bogie* dan sistem suspensi), matriks sistem interaksi antara roda dengan *track*, dan matriks sistem pada roda monorel. Dengan matriks $[M]$, $[c]$ dan $[k]$ menunjukkan massa, konstanta peredaman dan konstanta pegas. Tanda (\cdot) pada matriks vektor posisi menunjukkan turunan

vektor posisi terhadap waktu. Sedangkan matriks $\{F_{ve}\}$ dan $\{F_{we}\}$ menunjukkan gaya yang bekerja pada bagian struktur *bogie* dan bagian roda dari monorel. Menurut Song dan rekan [12] untuk mendapatkan persamaan interaksi antara monorel dengan *track* maka seluruh sistem persamaan struktur atas dengan struktur bawah harus digabungkan, sehingga matriks persamaan dari keseluruhan sistem interaksi antara monorel dengan *track* adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 & \left[\begin{array}{cc} [M_b + M_{uv(t+\Delta t)}] & 0 \\ \text{symm} & [M_{sv(t+\Delta t)}] \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \{ \ddot{a}_b \} \\ \{ \ddot{a}_v \} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} \\
 & + \left[\begin{array}{cc} [c_b + c_{uv(t+\Delta t)}] & [c_{bv(t+\Delta t)}] \\ \text{symm} & [c_{v(t+\Delta t)}] \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \{ d_b \} \\ \{ d_v \} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} \\
 & + \left[\begin{array}{cc} [k_b + k_{uv(t+\Delta t)}] & [k_{bv(t+\Delta t)}] \\ \text{symm} & [k_{v(t+\Delta t)}] \end{array} \right] \begin{Bmatrix} \{ d_b \} \\ \{ d_v \} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{Bmatrix} \{ F_b \} \\ \{ F_v \} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t}
 \end{aligned}$$

Dimana notasi matriks $[u_b]$, $[u_{uv}]$ dan $[u_{sv}]$ adalah matriks sistem *track*, sistem *carbody* dan sistem *bogie* dalam keseluruhan sistem monorel. Sedangkan matriks $\{F_b\}$ dan $\{F_v\}$ menunjukkan gaya yang bekerja pada bagian *track* dan bagian struktur sarana dari monorel.

Standar EN 12299:2009

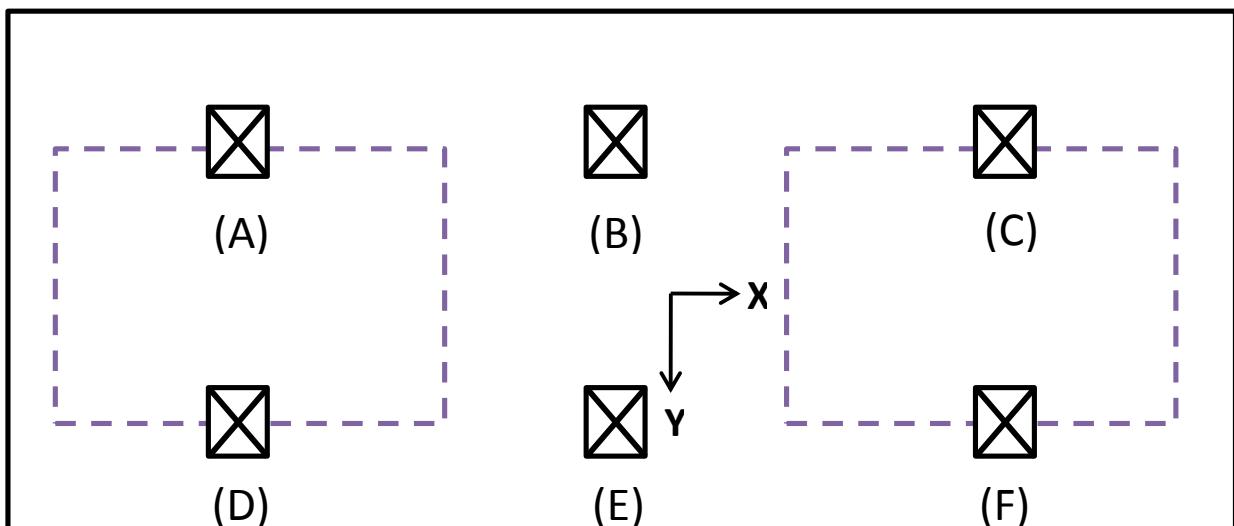
Standar EN 12299:2009 merupakan standar yang disusun oleh Komite Teknik CEN/TC 256 dalam aplikasi perkeretaapian. Standar ini umumnya diterapkan di negara-negara Eropa untuk mengukur dan mengevaluasi tingkat kenyamanan penumpang saat melakukan perjalanan dengan moda transportasi kereta api. Pada kajian untuk mengetahui tingkat kenyamanan penumpang dalam kereta api yang dilakukan dalam jurnal ini digunakan metode *Continuous Comfort*.

Untuk metode *continuous comfort* berdasarkan standar EN 12299:2009, skala tingkat kenyamanan dari nilai kuadrat dari percepatan rata-rata terhadap waktu arah lateral $C_{cy}(t)$ dan arah vertikal $C_{cz}(t)$ diukur dengan menggunakan skala kualitatif seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Skala tingkat kenyamanan untuk percepatan rata-rata arah lateral $C_{cy}(t)$ dan arah vertikal $C_{cz}(t)$

$C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0,20 \text{ m/s}^2$	Very comfortable
$0,20 \text{ m/s}^2 \leq C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0,30 \text{ m/s}^2$	Comfortable
$0,30 \text{ m/s}^2 \leq C_{cy}(t), C_{cz}(t) < 0,40 \text{ m/s}^2$	Medium
$0,40 \text{ m/s}^2 \leq C_{cy}(t), C_{cz}(t)$	Less comfortable

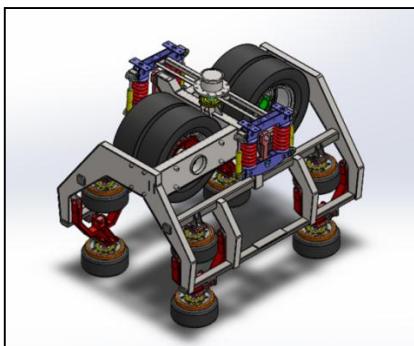
Dalam metode *Continuous Comfort* letak lokasi pengukuran dilakukan di atas lantai struktur *carbody* dengan titik koordinat pengukuran sebanyak enam titik pengukuran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Lokasi pengukuran respon dinamik dari tiap titik di atas lantai *carbody* untuk metode *Continuous Comfort* berdasarkan standar EN 12299:2009

Simulasi Dinamik

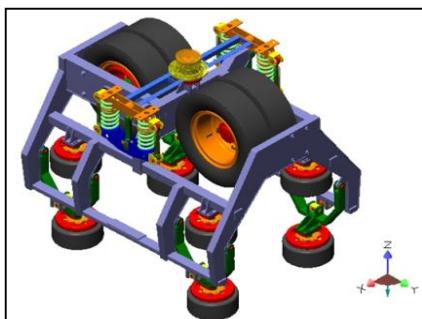
Program Simwise merupakan *tool* yang digunakan untuk keperluan analisis dan simulasi kinematik serta dinamik benda kaku, dimana dalam aplikasi ini dibuat model prototipe virtual dari struktur sarana monorel untuk menganalisa dan mensimulasikan perilaku gerak dari struktur sarana monorel secara menyeluruh.



Gambar 5. Model Bogie dalamSolidWorks

Model yang akan dianalisa dan disimulasikan di program Simwise diimporkan dari file CAD program SolidWorks yang bebas interferensi antar komponen dan *constraint* dan antar komponen dalam *assembly* yang telah terdefinisi sepenuhnya (Gambar 5.).

Program Simwise akan mengimpor geometri, properti massa dan *constraint* dari sistem CAD dan mengubahnya secara otomatis menjadi bentuk file Simwise (Gambar 6.).



Gambar 6. Model bogie dalam Simwise

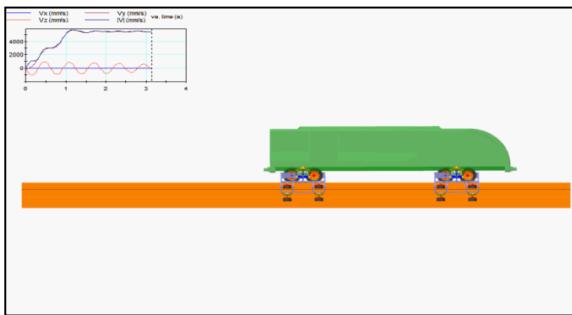
Kemudian data properti material dari struktur sarana monorel (Tabel 3.) dimasukkan di preferensi material dalam pengaturan simulasi dinamik. Dilakukan perubahan terhadap *constraint* model *bogie* yang telah terdefinisi secara otomatis dari sistem CAD menjadi *constraint* yang sesuai dengan perilaku gerak yang diinginkan. Perubahan objek *constraint* dari model bogie adalah dengan mendefinisikan *spherical joint* pada *spherical bearing* dalam komponen *suspension rod-end* dan *spherical bearing* dalam komponen *pin bolster*,

revolute joint pada komponen *bearing* roda traksi dengan roda pengarah dan roda penyeimbang, *spring/damper joint* pada bagian pegas dan *dashpot* serta *revolute motor* pada *bearing* roda traksi sebagai aktuator yang memberikan kecepatan gerak pada *bogie*.

Setelah *constraint* dari tiap komponen *bogie* telah didefinisikan dengan lengkap, maka langkah selanjutnya adalah memasukan nilai konstanta pada pegas dan *damper* (Tabel 1.) serta memberikan nilai kecepatan awal pada roda traksi dalam bogie dengan dengan nilai kecepatan konstan sebesar 5,85 rad/s atau setara dengan kecepatan 20 km/jam dalam arah translasi jika diameter dari roda traksi adalah 950 mm. Dalam simulasi ini sarana monorel bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang lintasan *track*. Dalam simulasi ini *track* dari lintasan monorel yang dikaji memiliki lebar 750 mm dengan panjang lintasan 40 m. *Track* diberikan kondisi batas sebagai tumpuan tetap sehingga analisis respon dinamik pada struktur monorel dapat dilakukan. Kemudian dilakukan pemeriksaan validasi ulang kinematika dari tipe sambungan pada tiap komponen dalam struktur sarana monorel.

Hal ini penting dalam proses perhitungan numerik karena kesalahan dalam pendefinisian jenis sambungan dan kontak akan memberikan hasil respon dinamik yang salah. Langkah berikutnya adalah menentukan lokasi atau koordinat titik pengukuran dari respon dinamik sistem monorel.

Koordinat pengukuran berada tepat di atas lantai dari struktur *carbody* monorel sesuai dengan ketetapan pada standar EN 12299:2009. Setelah koordinat dari pengukuran telah ditentukan, kemudian dilakukan penentuan parameter output respon dinamik yang akan dianalisis pada tiap titik lokasi pengukuran di atas. Hasil dari parameter ini adalah respon dinamik terhadap waktu berupa kurva yang menunjukkan perubahan perilaku gerak struktur sepanjang lintasan *track*. Tahapan terakhir adalah proses simulasi yang dilakukan dengan program Simwise 4D untuk mendapatkan hasil perhitungan numeriknya (Gambar 7). Setelah hasil respon dinamik diperoleh, kemudian hasil ini dibandingkan dengan standar EN 12299:2009 untuk mengevaluasi tingkat kenyamanan dari monorel. Secara garis besar tahapan proses awal sampai dengan proses akhir dari analisis dinamik ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 8.



Gambar 7. Simulasi dinamik struktur sarana monorel UTM 125 menggunakan program Simwise 4D

Analisa dan hasil pembahasan

Dalam simulasi dinamik monorel yang dilakukan dengan program Simwise 4D, hasil respon dinamik dari monorel yang bergerak di lintasan lurus pada tiap koordinat titik pengukuran kemudian dievaluasi karakteristiknya untuk mengetahui tingkat kenyamanan dari penumpang dengan menggunakan standar EN 12299:2009 sebagai acuan. Dengan menggunakan metode *Continous Comfort*, maka dapat diketahui tingkat kenyamanan penumpang yang berada di dalam struktur *carbody*.

Pada metode ini, perubahan respon dinamik dari percepatan terhadap waktu pada arah vertikal $C_{Cz}(t)$ dan pada arah lateral $C_{Cy}(t)$ adalah objek pengukuran. Nilai kuantitatif dari percepatan arah vertikal dan arah lateral dari tiap lokasi titik koordinat pengukuran (seperti ditunjukkan pada Gambar 4.) kemudian di evaluasi terhadap tingkat kenyamanan penumpang berdasarkan skala kualitatif yang dipersyaratkan pada Tabel 5. Untuk pengukuran percepatan arah vertikal di lokasi pengukuran titik A, B dan C (Gambar 9.) diketahui bahwa nilai simpangan dari nilai rata-rata (rms) percepatan arah vertikal pada titik A adalah $2763,55 \text{ mm/s}^2$ dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 5,12.

Pada titik B nilai rms dari percepatan arah vertikal adalah $2345,68 \text{ mm/s}^2$ dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,35 dan pada titik C nilai rms dari percepatan arah vertikal adalah 2474 mm/s^2 dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 4,11.

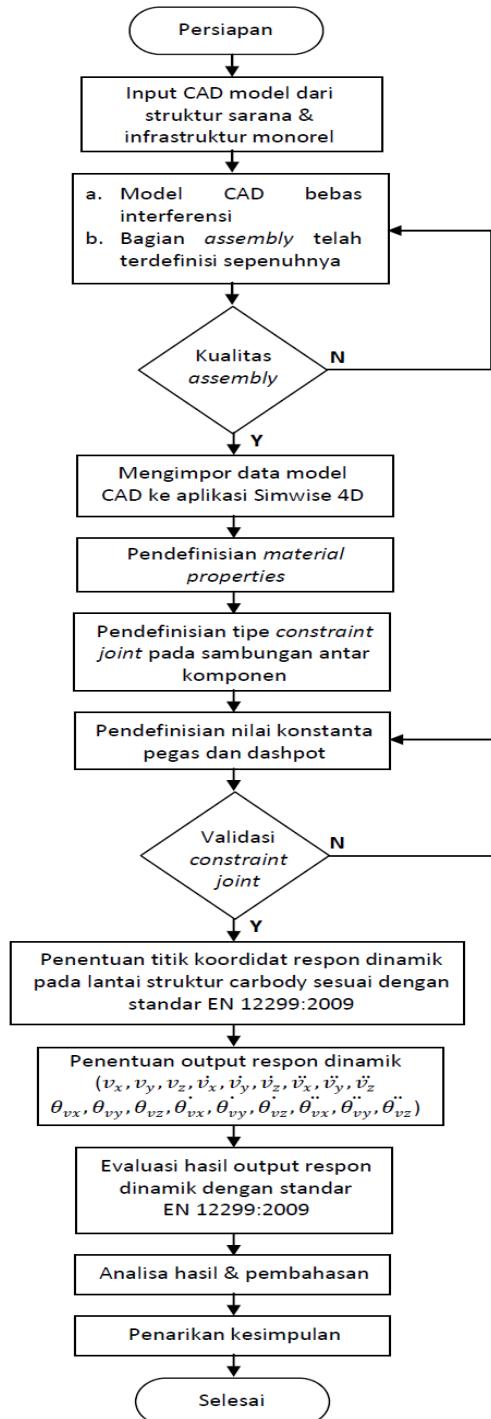
Pada lokasi pengukuran di titik D, E dan F (Gambar 10.) diketahui bahwa nilai rms percepatan arah vertikal pada titik D adalah $2786,5 \text{ mm/s}^2$ dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 5,01. Pada titik E nilai dari rms percepatan arah vertikal adalah $2371,2 \text{ mm/s}^2$ dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,86 dan pada titik F nilai rms dari percepatan arah vertikal adalah 2439 mm/s^2 dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,74. Berdasarkan komparasi dan evaluasi

keseluruhan data pengukuran dengan nilai standar dari 12299:2009 menggunakan metode *Continous Comfort* diketahui bahwa pada titik A dan titik D, nilai percepatan arah vertikal memiliki nilai yang paling besar dibandingkan dengan nilai titik pengukuran lainnya.

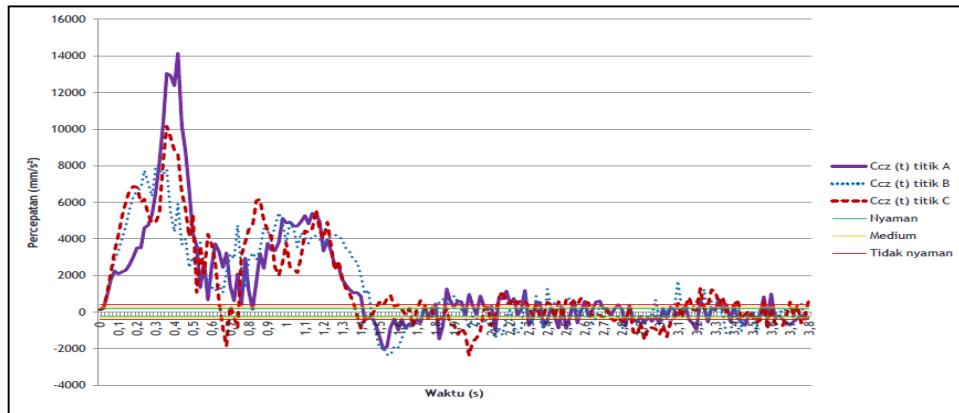
Untuk pengukuran percepatan arah lateral di lokasi pengukuran titik A, B dan C (Gambar 11.) diketahui bahwa nilai rms dari percepatan arah lateral di titik A adalah 2550 mm/s^2 dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,1. Pada titik B nilai rms dari percepatan arah lateral adalah 2881 mm/s^2 dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,41 dan pada titik C nilai rms dari percepatan arah lateral adalah $3068,7 \text{ mm/s}^2$ dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,08. Pada lokasi pengukuran di titik D, E dan F (Gambar 12.) diketahui bahwa nilai rms percepatan arah lateral pada titik D adalah 2607 mm/s^2 dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,07. Pada titik E nilai dari rms percepatan arah lateral adalah 2932 mm/s^2 dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,36 dan pada titik F nilai rms dari percepatan arah lateral adalah $3069,17 \text{ mm/s}^2$ dengan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms adalah 3,11. Dengan menggunakan metode yang sama diketahui bahwa pada titik C dan titik F, nilai percepatan arah lateral memiliki nilai yang paling besar dibandingkan dengan nilai titik pengukuran lainnya.

Kesimpulan

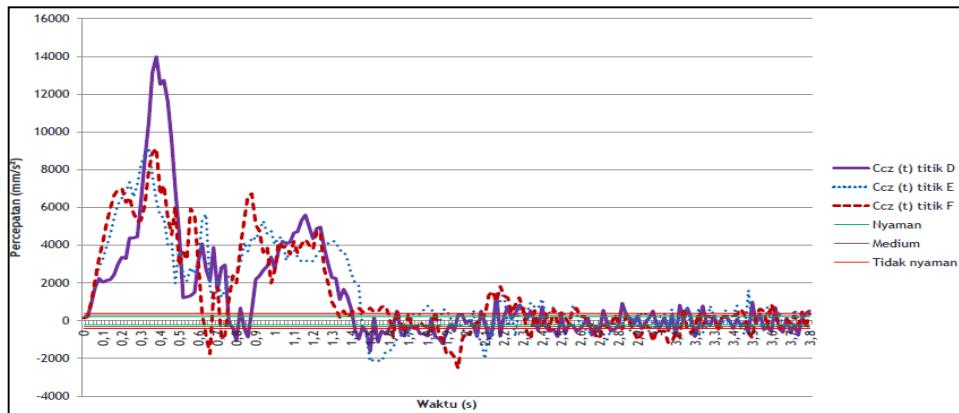
1. Berdasarkan tes kualitas model dan kontak sebelum simulasi dilakukan, telah didapat model yang bebas interferensi dan *assembly* yang terdefinisi sepenuhnya serta tidak ditemukan kontak pada bagian struktur *bogie* yang terduplikasi.
2. Berdasarkan hasil grafik respon dinamik pada *carbody* berupa karakteristik percepatan rata – rata arah lateral dan arah vertikal, setelah dievaluasi dengan standar EN 12299:2009 diketahui bahwa nilai rms percepatan arah vertikal $C_{Cz}(t)$ dan percepatan arah lateral $C_{Cy}(t)$ pada semua lokasi titik pengukuran melampaui batas kategori tidak nyaman.
3. Percepatan arah vertikal paling besar terjadi di lokasi bagian belakang lantai *carbody* dengan nilai percepatan melebihi 2700 mm/s^2 dan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms melebihi nilai 5.
4. Percepatan arah lateral paling besar terjadi pada bagian depan lantai *carbody* dengan nilai percepatan melebihi 3000 mm/s^2 dan rasio antara nilai puncak dengan nilai rms melebihi nilai 3.



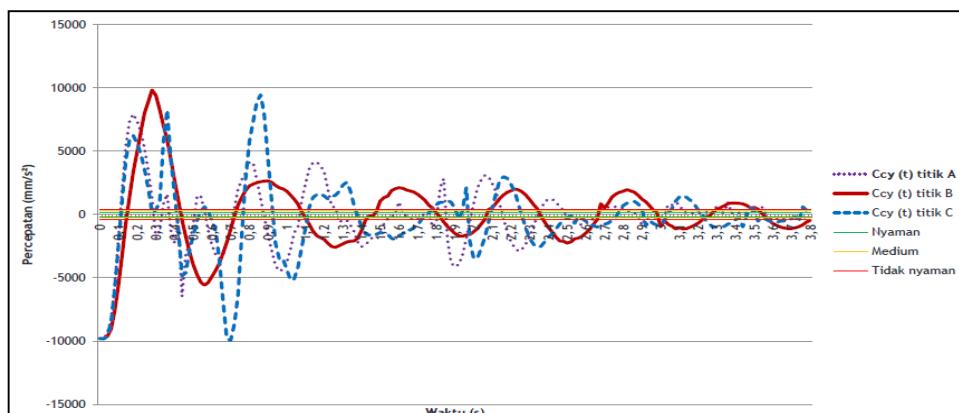
Gambar 8. Diagram alir tahapan proses analisis & simulasi dinamik struktur monorel



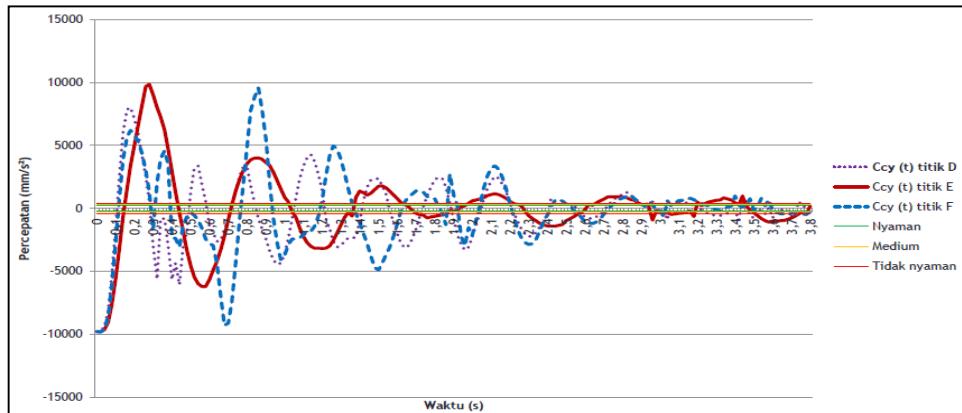
Gambar 9. Nilai percepatan vertikal $Ccz(t)$ pada lokasi pengukuran di titik A, B dan C



Gambar 10. Nilai percepatan vertikal $Ccz(t)$ pada lokasi pengukuran di titik D, E dan F



Gambar 11. Nilai percepatan lateral $Ccy(t)$ pada lokasi pengukuran di titik A, B dan C



Gambar 12. Nilai percepatan lateral $Cc_y(t)$ pada lokasi pengukuran di titik D, E dan F

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 2014.

Referensi

- [1]. http://id.wikibooks.org/wiki/Manajemen_Lalu_Lintas/Permasalahan_lalu_lintas. April, 2013.
- [2]. Komsorsium BUMN. Proposal Pemecahan Kemacetan di Jalan Protokol Jakarta. Jakarta, Indonesia. 7 Februari 2013.
- [3]. Nugroho, Teguh. *Design Criteria of Civil Construction of Monorail UTM-125 Guideway*. PT. Melu Bangun Wiweka. 2011.
- [4]. Wong, J. Y. *Theory of Ground Vehicles*-3rd ed. John Wiley & Sons, Inc. :USA. 2001.
- [5]. C. W. Wegst. *Stahlschlüssel (Key to Steel)*. Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH. 1992.
- [6]. Solidworks 2013. Solidworks DIN Materials. Dassault Systemes: France. 2013.
- [7]. British Standard EN 12299. *Railway Applications – Ride Comfort for Passengers – Measurement and Evaluation*. UK, 2009.
- [8]. X. Lei, N. A. Noda. Analyses of dynamic response of vehicle and track coupling system with random irregularity of track vertical profile. *Journal of Sound and Vibration*. 2002. 147-165.
- [9]. Lee CH, Kim CW, Kawatani M, Nishimura N, Kobayashi Y. Dynamic response analysis of monorail bridges under moving trains and riding comfort trains. *Eng Struct*. 2005. 1999-2013.
- [10]. Lee CH, Kim CW, Kawatani M, Nishimura N, Kobayashi Y. Dynamic response of a monorail steel bridge under a moving train. *Journal of Sound and Vibration*. 2006. 562-579.
- [11]. Yang YB, Wu YS. A versatile element for analyzing vehicle-bridge interaction response. *Eng Struct*. 2001. 452-469
- [12]. Song MK, Noh HC, Choi CK. A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train-bridge interactions. *Eng Struct*. 2003. 1611-1626.
- [13]. K. Liu, E. Reynders, G. De Roeck, G. Lombaert. Experimental and numerical analysis of a composite bridge for high-speed trains. *Journal of Sound and Vibration*. 2008. 201-220.
- [14]. K. Liu, E. Reynders, G. De Roeck, G. Lombaert. The effect of dynamic train-bridge interaction on the bridge response during a train passage. *Journal of Sound and Vibration*. 2009. 240-251.