

Analisa Kenyamanan Kendaraan Angkut Massal dengan Pemodelan Pengemudi sebagai Sistem Multi-DOF

Nava Amalia, Harus Laksana Guntur

Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: haruslg@me.its.ac.id

Abstrak—Kendaraan umum atau alat transportasi massal merupakan kendaraan yang sering digunakan oleh masyarakat Indonesia yang tidak memiliki kendaraan pribadi untuk bepergian. Masyarakat lebih menyukai menggunakan bus untuk melakukan perjalanan jauh karena waktunya lebih *flexible* dibandingkan kereta api. Supir bus menempuh perjalanan yang jauh sehingga mereka lelah. Hal ini dipengaruhi oleh tingkat kenyamanan mengemudi. Kenyamanan dalam berkendara merupakan hal yang penting karena kelelahan yang dialami supir dapat menyebabkan terjadinya kecelakaan. Untuk mengatasi masalah ini maka akan dimodelkan dan disimulasikan dinamika kendaraan angkut massal (bus) dan pengemudinya. Untuk mengetahui respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) yang dialami oleh supir. Secara garis besar penelitian ini akan dimodelkan dan disimulasikan dinamika kendaraan angkut massal (bus). Hasil simulasi berupa respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) dari pengemudi bus dianalisa dan ditinjau dari standar kenyamanan. Selain itu akan dianalisa mengenai *frequency respon* untuk mengetahui perbandingan *input* dan *output* yang diberikan pada kendaraan. *Input* yang diberikan berupa step dan harmonik. Dari penelitian ini didapatkan dari hasil simulasi *time response* bahwa pada amplitudo maksimum yaitu 0,03 m pada kecepatan 40 km/jam RMS percepatan hasil simulasi pengemudi pada bagian kepala sebesar $0,5398 \text{ m/s}^2$, dada adalah $0,5431 \text{ m/s}^2$, perut adalah $0,5144 \text{ m/s}^2$, dan pinggul adalah $0,5466 \text{ m/s}^2$ yang menurut standar ISO 2631 berada pada kondisi sedikit tidak nyaman. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan yang dialami pengemudi pada bagian kepala sebesar $1,454 \text{ m/s}^2$, dada adalah $1,447 \text{ m/s}^2$, perut adalah $1,074 \text{ m/s}^2$, dan pinggul adalah $1,395 \text{ m/s}^2$ menurut standar ISO 2631 berada pada kondisi sangat tidak nyaman.

Kata kunci— pemodelan sistem dinamis, transportasi massal darat, dinamika bus dan pengemudinya, kenyamanan berkendara.

I. PENDAHULUAN

Kendaraan umum merupakan suatu kendaraan yang sering digunakan oleh masyarakat Indonesia yang tidak memiliki kendaraan pribadi untuk pergi ke suatu tempat yang letaknya jauh dan tidak bisa ditempuh dengan berjalan kaki. Kendaraan umum sering juga disebut alat transportasi massal. Kendaraan umum di Indonesia bermacam-macam, ada yang digunakan dalam lingkup antar kecamatan, kabupaten/kota, dan propinsi. Kendaraan umum tersebut seperti angkot, bus, kereta api maupun pesawat. Alat transportasi massal darat yang biasanya digunakan untuk menempuh perjalanan antar kota adalah kereta atau bus. Namun masyarakat umum lebih suka menggunakan bus

untuk melakukan perjalanan jauh.

Bus dijadikan pilihan oleh masyarakat umum karena waktunya yang lebih fleksibel dibandingkan dengan kereta api yang harus menyesuaikan dengan jadwal yang sudah ditentukan. Bus dapat mengangkut sekitar 50 sampai 60 penumpang. Bus umumnya melayani trayek antar kota dalam propinsi ataupun luar propinsi. Umumnya supir bus duduk di atas kursi pengemudi rata-rata 4 jam dan berhenti setiap kurang lebih 1 jam karena di setiap kota ada terminal pemberhentian. Namun sopir hanya berhenti dalam waktu kurang dari 3 menit. Dengan kondisi jalan yang tidak rata dan cenderung bergelombang di setiap kota menyebabkan supir cepat lelah. Hal ini erat hubungannya dengan kenyamanan selama mengemudi. Kelelahan sopir merupakan salah satu faktor penyebab terjadinya kecelakaan.

Kenyamanan dalam berkendara sudah menjadi tuntutan bagi para pengendaranya. Sejalan dengan tuntutan kenyamanan yang semakin tinggi maka penelitian akan kenyamanan berkendara dewasa ini banyak dilakukan. Kondisi ideal yang ingin diperoleh adalah kemampuan pengemudi untuk menahan getaran selama mungkin. Pada umumnya sopir bus banyak yang belum mengetahui tentang hal ini. Para sopir bus hanya beristirahat ketika berhenti pada tempat yang bisa digunakan untuk menunggu penumpang (bukan di terminal). Dari uraian di atas, akan dimodelkan dan disimulasikan dinamika kendaraan umum (bus) dan pengemudinya. Hasil simulasi berupa respon dinamis (perpindahan, kecepatan, percepatan) dari pengemudi bus dianalisa dan ditinjau dari standar kenyamanan.

II. URAIAN PENELITIAN

Mengacu pada penelitian Dragan Sekulic', Vlastimir Dedovic, Srdjan Rusov a, Slaviša Šalinic, dan Aleksandar Obradovic pada tahun 2013 melakukan penelitian mengenai kenyamanan berkendara pada pengemudi dan penumpang bus yang ditinjau dengan menggunakan standar ISO 2631. Inputnya yaitu pada kontur jalan aspal yang kasar, gambar 1 merupakan bus IK-301 dan gambar 2 merupakan pemodelan dari bus yang dianalisa.



Gambar 1 Bus IK-301

Pemodelan terdiri dari empat massa yang dihubungkan oleh empat pasang pegas dan redaman. Empat massa tersebut mempresentasikan empat bagian tubuh berurutan yaitu massa kepala (m_1), massa dada dan *upper torso* (m_2), massa *lower torso* (m_3), dan massa paha dan pinggang yang berada di tempat duduk kendaraan (m_4). Massa dari kaki bagian bawah diabaikan pengaruhnya terhadap *biodynamics response* dari *seated body*. Sedangkan kekakuan dan *damping properties* dari paha (k_4) dan (c_4), *lower torso* (k_3) dan (c_3), *upper torso* (k_2) dan (c_2), serta kepala (k_1) dan (c_1).

Berdasarkan data *anthropometric* Boileau proporsi dari berat tubuh manusia adalah 7.5% untuk kepala, 40.2% untuk dada dan *upper torso*, 12.2% untuk *lower torso*, dan 18.2% untuk paha dan kaki bagian atas. Untuk seseorang yang sedang duduk, berat badan yang ditumpu oleh *seat* adalah sebesar 78%. Dan untuk nilai kekakuan dan redaman dari tubuh manusia dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

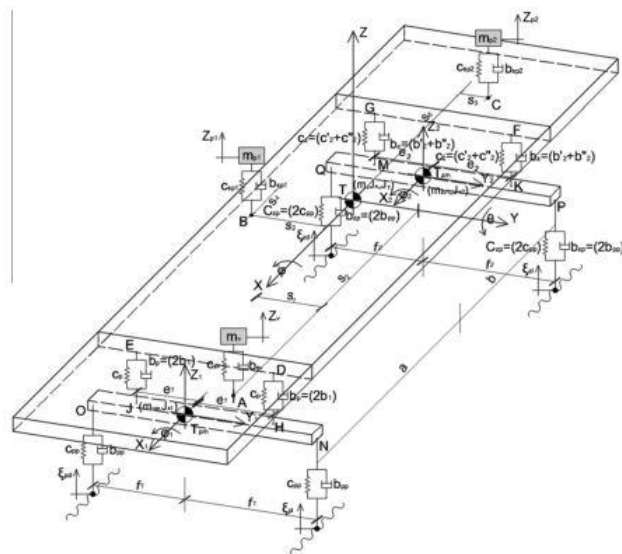
Tabel 1 Parameter model Biomechanical dari Boileau dan Rakheja

Stiffness Coefficient (N/m)	Damping coefficient (N.s/m)
$k_1 = 310000$	$c_1 = 400$
$k_2 = 183000$	$c_2 = 4750$
$k_3 = 162800$	$c_3 = 4585$
$k_4 = 90000$	$c_4 = 2064$

Standar kenyamanan yang digunakan dalam simulasi adalah ISO 2631 yang dilaskan pada tabel 2.

Tabel 2 Reaksi Kenyamanan Pengemudi – ISO 2631

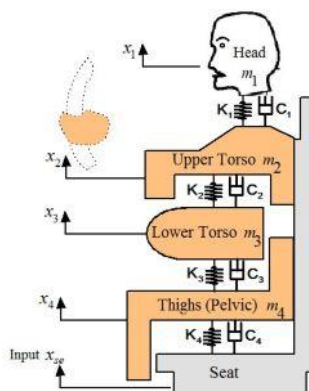
No.	Getaran	Keterangan
1	$> 0,315 \text{ m/s}^2$	Tidak ada keluhan
2	$0,315 - 0,63 \text{ m/s}^2$	Sedikit tidak nyaman
3	$0,5 - 1 \text{ m/s}^2$	Agak tidak nyaman
4	$0,8 - 1,6 \text{ m/s}^2$	Tidak nyaman
5	$1,25 - 2,5 \text{ m/s}^2$	Sangat tidak nyaman
6	$> 2 \text{ m/s}^2$	Amat sangat tidak nyaman



Gambar 2 Pemodelan Bus IK-301

Gambar 1 dan 2 dianalisa dan didapatkan persamaan gerak dari sistem yang akan dimasukkan ke Matlab. Dari Matlab didapatkan mengenai kenyamanan yang dialami pengemudi dan penumpang pada saat berjalan pada profil jalan aspal kasar.

Selain itu, penelitian ini juga mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Mostafa dan Abbas mengenai pemodelan bentuk tubuh manusia. Pemodelan tubuh manusia diperlihatkan pada gambar 3. Referensi yang digunakan Mustofa dan Abbas yaitu penelitian yang dilakukan oleh Boileau and Rakheja.



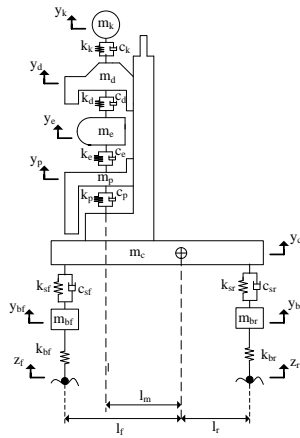
Gambar 3 Pemodelan Manusia

III. HASIL DAN ANALISA

Hasil dari penelitian ini berupa pemodelan setengah kendaraan angkut massal (bus) dengan pengemudinya. Dari gambar tersebut akan dianalisa hasil simulasi yang berupa *frequency response* dan *time response*.

3.1 Pemodelan Setengah Kendaraan dan Pengemudinya

Pada penelitian ini, didapatkan pemodelan setengah kendaraan dan pengemudinya. Dari pemodelan ini nantinya akan dibuat persamaan gerak dan matrik *state space* yang akan dipergunakan untuk simulasi.



Gambar 4 Pemodelan Setengah Kendaraan dan Pengemudinya

Pada gambar 4 didapatkan persamaan gerak dibawah ini:

$$m_{bf}\ddot{y}_{bf} + k_{sf}(y_{bf} - (y_c + l_f\theta)) - k_{bf}(z_f - y_{bf}) + c_{sf}(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f\dot{\theta})) - c_{bf}(\dot{z}_f - \dot{y}_{bf}) = 0 \tag{2.1}$$

$$m_{br}\ddot{y}_{br} + k_{sr}(y_{br} - (y_c - l_r\theta)) - k_{br}(z_r - y_{br}) + c_{sr}(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r\dot{\theta})) - c_{br}(\dot{z}_r - \dot{y}_{br}) = 0 \tag{2.2}$$

$$m_c\ddot{y}_c + k_p((y_c + l_m\theta) - y_p) - k_{sf}(y_{bf} - (y_c + l_f\theta)) - k_{sr}(y_{br} - (y_c - l_r\theta)) + c_p((\dot{y}_c + l_m\dot{\theta}) - \dot{y}_p) - c_{sf}(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f\dot{\theta})) - c_{sr}(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r\dot{\theta})) = 0 \tag{2.3}$$

$$J\ddot{\theta} + k_p l_m((y_c + l_m\theta) - y_p) - k_{sf} l_f(y_{bf} - (y_c + l_f\theta)) + k_{sr} l_r(y_{br} - (y_c - l_r\theta)) + c_p l_m((\dot{y}_c + l_m\dot{\theta}) - \dot{y}_p) - c_{sf} l_f(\dot{y}_{bf} - (\dot{y}_c + l_f\dot{\theta})) + c_{sr} l_r(\dot{y}_{br} - (\dot{y}_c - l_r\dot{\theta})) = 0 \tag{2.4}$$

$$m_p\ddot{y}_p + k_e(y_p - y_e) - k_p((y_c + l_m\theta) - y_p) + c_e(\dot{y}_p - \dot{y}_e) - c_p((\dot{y}_c + l_m\dot{\theta}) - \dot{y}_p) = 0 \tag{2.5}$$

$$m_e\ddot{y}_e + k_d(y_e - y_d) - k_e(y_p - y_e) + c_d(\dot{y}_e - \dot{y}_d) - c_e(\dot{y}_p - \dot{y}_e) = 0 \tag{2.6}$$

$$m_d\ddot{y}_d + k_k(y_d - y_k) - k_d(y_e - y_d) + c_k(\dot{y}_d - \dot{y}_k) - c_d(\dot{y}_e - \dot{y}_d) = 0 \tag{2.7}$$

$$m_k\ddot{y}_k - k_k(y_d - y_k) - c_k(\dot{y}_d - \dot{y}_k) = 0 \tag{2.8}$$

Pemodelannya meliputi m_k (massa kepala), m_d (massa dada), m_e (massa perut), m_p (massa pinggul), m_c (massa chassis), m_{bf} (massa ban depan), dan m_{br} (massa ban belakang). Selain itu, pemodelan matematis pada gambar 4 didapatkan nilai dari matriks A, G, dan u. Lalu dengan metode state space akan didapatkan nilai $(\dot{y}_{bf}, \dot{y}_{br}, \dot{y}_c, \dot{\theta}, \dot{y}_p, \dot{y}_e, \dot{y}_d, \dot{y}_k, \dot{y}_{bf}, \dot{y}_{br}, \dot{y}_c, \dot{\theta}, \dot{y}_p, \dot{y}_e, \dot{y}_d, \dot{y}_k, y_{bf}, y_{br}, y_c, \theta, y_p, y_e, y_d, y_k)$. Data yang didapatkan tersebut merupakan hasil simulasi yang berupa frequency response. Untuk mendapatkan hasil simulasi yang berupa time response maka persamaan yang berada diatas dibuat ke bentuk diagram blok Simulink. Dari diagram blok pada Simulink, dianalisis pada amplitudo 3 cm dan kecepatan 40, 60, dan 100 km/jam untuk mengetahui respon dinamis pengemudi yang berupa percepatan dengan input sinusoidal yang akan dibandingkan dengan standar ISO 2631. Data yang dimasukkan dalam simulasi berada pada tabel 3.

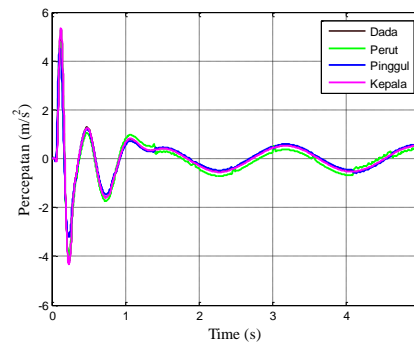
Tabel 4.1 Parameter Komponen Kendaraan dan Pengemudi

Keterangan Komponen	Simbol	Nilai	Satuan
Kendaraan			
Massa Ban Depan	m_{bf}	745	kg
Massa Ban Belakang	m_{br}	1355	kg
Massa Kendaraan	m_c	11900	kg
Inersia Kendaraan	J	50000	kg.m ²
Konstanta Kekakuan Ban Depan	k_{bf}	1000000	N/m
Konstanta Kekakuan Ban Belakang	k_{br}	2000000	N/m
Konstanta Kekakuan Suspensi Depan	k_{sf}	350000	N/m
Konstanta Kekakuan Suspensi Belakang	k_{sr}	811250	N/m
Konstanta Peredam Suspensi Depan	c_{sf}	40000	N.s/m
Konstanta Peredam Suspensi Belakang	c_{sr}	45973	N.s/m
Jarak Ban Depan ke center of gravity	l_f	3,12	m
Jarak Ban Belakang ke center of gravity	l_r	2,53	m
Pengemudi			
Massa Kepala	m_k	5,625	kg
Massa Dada	m_d	30,15	kg
Massa Perut	m_e	9,15	kg
Massa Pinggul	m_p	13,65	kg
Konstanta Kekakuan Kepala	k_k	310000	N/m
Konstanta Kekakuan Dada	k_d	183000	N/m
Konstanta Kekakuan Perut	k_e	162800	N/m
Konstanta Kekakuan Pinggul	k_p	90000	N/m
Konstanta Peredam Kepala	c_k	400	N.s/m
Konstanta Peredam Dada	c_d	4750	N.s/m
Konstanta Peredam Perut	c_e	4585	N.s/m
Konstanta Peredam Pinggul	c_p	2064	N.s/m
Jarak Pengemudi ke center of gravity	l_m	4,62	m

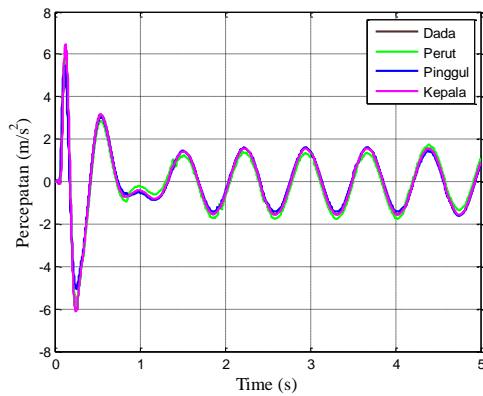
3.2 Pembahasan Grafik

Pembahasan grafik adalah analisa yang dilakukan untuk mendapatkan gambaran hasil dari penelitian yang dilakukan. Grafik dibuat dengan menyimulasikan persamaan gerak pada software simulink untuk analisa *time response*.

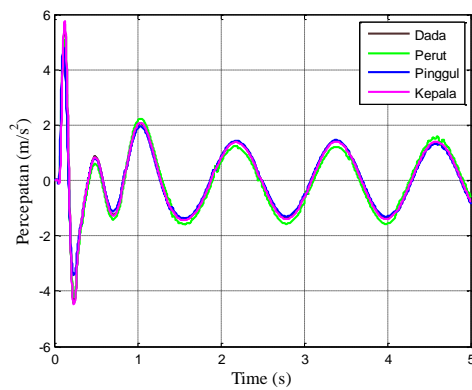
3.2.1 Grafik Time Response Percepatan Pengemudi



Gambar 7 Grafik Time Response Percepatan (Acceleration) pada kec. 40 km/jam



Gambar 8 Grafik Time Response Percepatan (Acceleration) pada kec. 60 km/jam

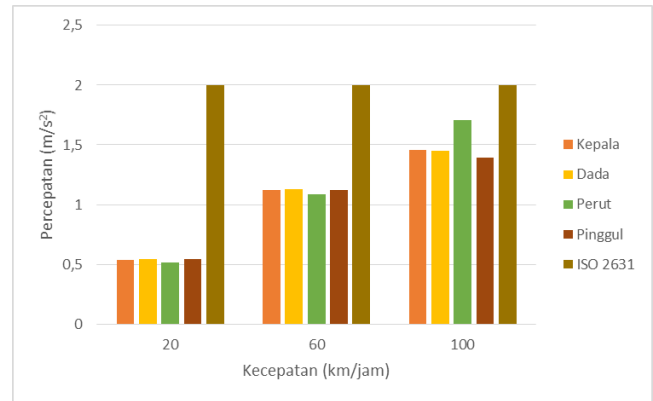


Gambar 9 Grafik Time Response Percepatan (Acceleration) pada kec. 100 km/jam

Pada gambar 7 terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 40 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah $\pm 0,556 \text{ m/s}^2$, dada adalah $\pm 0,56 \text{ m/s}^2$, perut adalah $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$, dan pinggul adalah $\pm 0,56 \text{ m/s}^2$. Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 8 terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 60 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah $\pm 1,47 \text{ m/s}^2$, dada adalah $\pm 1,48 \text{ m/s}^2$, perut adalah $\pm 1,46 \text{ m/s}^2$, dan pinggul adalah $\pm 1,45 \text{ m/s}^2$. Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama.

Pada gambar 9 terlihat respon percepatan yang dialami bagian tubuh pengemudi pada kecepatan 100 km/jam dan amplitudo 0,03 m. Pada grafik terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi. Percepatan maksimum untuk kepala adalah $\pm 1,65 \text{ m/s}^2$, dada adalah $\pm 1,64 \text{ m/s}^2$, perut adalah $\pm 1 \text{ m/s}^2$, dan pinggul adalah $\pm 1,6 \text{ m/s}^2$. Terlihat percepatan maksimum yang dialami tubuh pengemudi relatif sama. Gambar dibawah ini merupakan RMS percepatan yang dialami oleh bagian tubuh pengemudi pada variasi kecepatan yang dilakukan selama simulasi:



Gambar 10 Grafik Nilai RMS Percepatan Bagian Tubuh Pengemudi Untuk Kecepatan yang Bervariasi

Gambar 10 merupakan RMS percepatan hasil simulasi yang dialami tubuh pengemudi. Pada kecepatan 40 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sedikit tidak nyaman. Berdasarkan ISO 2631 RMS percepatan hasil simulasi pengemudi pada kecepatan 70 km/jam berada pada kondisi tidak nyaman. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sangat tidak nyaman.

IV. KESIMPULAN

1. Pada input harmonik dengan amplitudo 0,03 m dengan kecepatan 40 km/jam RMS percepatan manusia pada bagian kepala sebesar $0,5398 \text{ m/s}^2$, dada adalah $0,5431 \text{ m/s}^2$, perut adalah $0,5144 \text{ m/s}^2$, dan pinggul adalah $0,5466 \text{ m/s}^2$. Pada kecepatan 100 km/jam RMS percepatan manusia pada bagian kepala sebesar $1,454 \text{ m/s}^2$, dada adalah $1,447 \text{ m/s}^2$, perut adalah $1,074 \text{ m/s}^2$, dan pinggul adalah $1,395 \text{ m/s}^2$. Pada kecepatan 40 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sedikit tidak nyaman sedangkan untuk kecepatan 100 km/jam RMS percepatan hasil simulasi yang dialami pengemudi berada pada kondisi sangat tidak nyaman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST, M.Eng yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian kali ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A, Mostafa dan Abbas, W. 2011. **Prediction The Biodynamic Response Of The Seated Human Body Using Artificial Intelligence Technique**. Cairo University : Mesir
- [2] Dumitriu, Mădălina. 2012. **Influence Of The Suspension Damping On Ride Comfort Of Passenger Railway Vehicles**. University Politehnica of Bucharest, Rumania
- [3] Rao, Singiresu S. 2010. **Mechanical Vibrations (5th Edition)**. N.J.:Prentice Hall.

- [4] Sekulic, Dragan dan Devodic, Vlastimir. 2013. **The Effect Of Stiffness And Damping Of The Suspension System Elements On The Optimisation Of The Vibrational Behaviour Of A Bus.** Belgrade, Serbia
- [5] Sekulić, Dragan, Vlastimir, Dedović dan Srđan Rusov. 2011. **Effect Of Shock Vibrations Due To Speed Control Humps To The Health Of City Bus Drivers.** Beograd, Serbia
- [6] Sekulic, Dragan dan Vlastimir Dedovic, dkk. 2013. **Analysis of Vibration Effects on the Comfort of Intercity Bus Users by Oscillatory Model with Ten Degrees of Freedom.** Belgrade, Serbia
- [7] Sutantra, I Nyoman dan Sampurno, Bambang. 2010. **Teknologi Otomotif (Edisi Kedua).** Surabaya: Guna Widya