

The Selection Method of A Monorail Bogie Frame Design Model

Sugiharto¹, Gatot Prayogo², Tresna P Soemadi² dan Danardono AS^{2,*}

¹Jurusan Teknik Mesin-Fakultas Teknik, Universitas Pasundan – Bandung -Jawa Barat

²Departemen Teknik Mesin-Fakultas Teknik, Universitas Indonesia – Depok-Jawa Barat

*Corresponding author: danardon@eng.ui.ac.id

Abstract. This paper discusses the method of selecting a bogie frame that will be used on a monorail prototype. The selection process was carried out by examining eight concepts, which were evaluated based on several criteria. A strength analysis was performed for each concept. The analysis was performed numerically with the finite element method, and the numerical solution was reached through the software ANSYS. The results of the analysis were used to select the bogie frame. The alternative selection process of the frame was performed through the *Analytical Hierarchy Process (AHP)* method. The AHP solution was performed using the software *Expert Choice*. Based on the results of a combined perception assessment, the experts chose concept #2 as the bogie frame. The frame geometry of concept #2 resembled the number "8"; this geometry is considered to not yet satisfy the criterion of a simple overhaul process. Accommodating this criterion requires fastening a system to the traction wheels axle (so that the overhaul process of the traction wheels will be easy).

Abstrak. Pada paper ini dibahas metode pemilihan model desain rangka bogie monorel yang akan digunakan pada prototipe monorel yang sudah dibuat. Pemilihan dilakukan pada delapan varian konsep yang didasarkan beberapa kriteria yang ditentukan. Analisis kekuatan untuk setiap konsep dilakukan secara numerik dengan metoda elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ANSYS. Hasil analisis tersebut selanjutnya dijadikan parameter penilaian dalam proses pemilihan. Pemilihan alternatif varian konsep dilakukan dengan metoda *Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Solusi analisis AHP diselesaikan dengan bantuan perangkat lunak *Expert Choice*. Hasil kompilasi penilaian *expert* dipilih konsep #2 sebagai model desain rangka bogie yang akan diusulkan untuk digunakan. Bentuk rangka konsep #2 adalah bentuk yang menyerupai angka "8", bentuk ini adalah bentuk yang dianggap belum memenuhi kriteria kemudahan proses bongkar pasang roda penggerak. Bentuk ini cukup sulit untuk melakukan proses tersebut dibanding bentuk rangka yang menyerupai huruf "S". Sehingga untuk mengakomodir kriteria tersebut perlu dirancang suatu mekanisme sistem pengikat roda penggerak sehingga proses bongkar pasangnya mudah dilakukan.

Keywords: AHP, pemilihan, bogie, frame, monorel

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

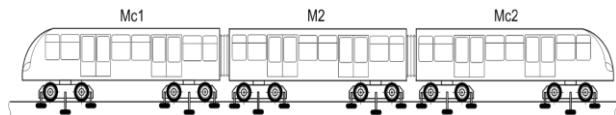
Pendahuluan

Rangka pada bogie monorel adalah komponen utama yang tidak boleh gagal atau rusak pada saat digunakan. Rangka harus kuat, kaku tapi ringan. Dalam perancangan rangka bogie ada beberapa persyaratan yang sudah distandardkan sehingga seluruh tahapan desain harus merujuk pada standar tersebut.

Pada paper ini akan dibahas metode pemilihan model desain rangka bogie monorel jenis straddle yang akan digunakan pada prototipe monorel yang sudah ada, standard desain yang digunakan dalam proses perancangan rangka bogie adalah EN 13749:2011 [1].

Prototipe yang akan menggunakan hasil desain ini adalah prototipe monorel jenis *straddle*, dengan formasi dalam satu rangkaian direncanakan akan disusun oleh tiga unit kabin penumpang yang

dipasang secara seri Mc1-M2-Mc2. Tiap kabin penumpang akan ditumpu oleh dua unit bogie.



Gambar 1. Formasi rangkaian prototipe monorel

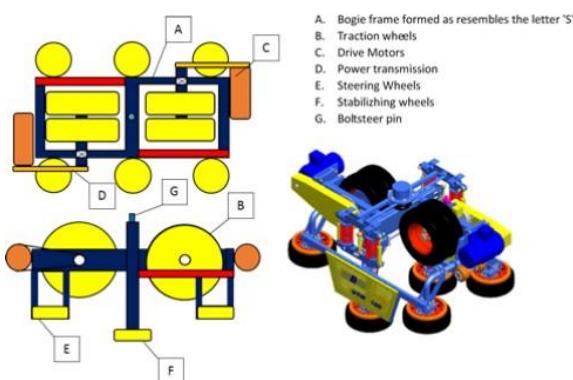
Rangka utama bogie prototipe monorel yang sudah dibuat menggunakan material SS400 rangka utama tempat dipasangnya roda penggerak dibentuk menyerupai huruf "S", dua poros roda penggerak dipasang pada rangka utama secara *cantilever*. Jarak sumbu poros antara dua gandar roda penggerak adalah 1230 mm, beban maksimum pada masing-masing poros roda penggerak maksimum adalah 6 ton. Tiap roda penggerak akan digerak oleh satu unit motor penggerak, Motor penggerak ditempatkan di tiap ujung depan dan belakang

rangka bogie. Spesifikasi desain prototipe monorel disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi desain prototipe monorel

Item	Dimensi
□ Panjang kereta (mm)	MC1,MC2 : 13200 MC : 12000
□ Lebar kereta (mm)	: 2500
□ Tinggi kereta (mm)	: 3600
□ Kapasitas Angkut (orang)	: ± 100
□ Berat (ton/kereta)	: 24
□ Jarak sumbu antar bogie (mm)	: 8400
□ Jarak antar kereta pada sambungan (mm)	: 684
□ Percepatan (m/s ²)	: 0.833
□ Perlambatan (m/s ²)	: 1.25
□ Radius belok minimum (m)	: 60
□ Gradien maksimum (%)	: 5
□ Jarak sumbu roda penggerak (mm)	: 1100
□ Beban maksimum roda penggerak (ton)	: 6
□ Maksimum kecepatan operasi (km/jam)	▪ lurus : 70 ▪ belok : 20

Ditinjau dari klasifikasi prototipe [2], prototype monorel yang dibuat adalah prototipe baru dalam tahap desain industri (*industrial design prototypes*) sehingga belum bisa didefinisikan bisa digunakan sebagai sarana transportasi massal. Untuk melihat kemampuannya dilakukan analisis kekuatan pada rangka bogie monorel yang sudah dibuat tersebut, hasil analisis disimpulkan pelu dilakukan modifikasi bentuk angka dan perubahan material yang digunakan [3].



Gambar 2. Skematik desain bogie prototipe monorel

Proses perbaikan desain rangka bogie prototipe didasarkan pada beberapa parameter yaitu:

- Bogie yang akan dibuat tidak mengalami perubahan dimensi dari ukuran bogie prototipe sebelumnya.

- Bogie menggunakan dua poros penggerak non-steerable
- Bogie akan dipasang secara independen seperti bogie prototipe sebelumnya.
- Bogie harus mampu memberikan efek fleksibilitas gerak monorel untuk bisa dijalankan pada radius belok kecil $R \leq 60$ m.
- Pemasangan bogie pada monorel bisa dilakukan dengan mudah.
- Perawatan dan pergantian roda penggerak (komponen cepat aus) pada bogie mudah dilakukan.

Tabel 2. Spesifikasi umum monorel jenis *straddle* dari beberapa pabrikan [4]

Karakteristik	Hitachi Large Type [Series 1000]	Monorail Malaysia (Scomi)	Bombardier M-VI
Panjang kereta/body (m)	14,8 (MC) 13,9 (M)	10,4 (MC) 8,6 (M)	11,8 (MC) 9,2 (M)
Lebar kereta/body (m)	2,98	3,0	2,64
Tinggi kereta/body (m)	5,2	4,3	3,4
Kapasitas normal (duduk/berdiri) @ 4 penumpang/ m ²	415 (177/238)	316 (96/220)	224 (84/140)
Jumlah Bogie/kereta	2	2	2
Jumlah Gandar/kereta (Gandar/bogie)	4 (2 gandar) independen	2 (1 gandar) independen	2 (1 gandar) articulated
Beban maksimum pada gandar (ton)	11	10	10
Roda	Karet Balok Beton/Baja	Karet Balok Beton/ Baja	Karet Balok Beton/ Baja
Sumber penggerak	1500 DC	750 or 1500 DC	750 DC
Suspensi	udara	udara	udara
Minimum radius belok (m)	70	70	45
Kecepatan desain/ pengoperasian (km/jam)	90/80	90/80	85/75
Kecepatan pada saat dilintaskan belok (km/jam)	20	20	20

Dari parameter diatas ada parameter desain, diluar standar desain dari beberapa pabrikan yang ada yaitu pada tingkat kemampuan beloknya, padahal dari beberapa desain yang sudah digunakan untuk monorel ukuran sedang umumnya memiliki kekampuan belok rata-rata di radius 70 m. Spesifikasi umum monorel jenis straddle yang banyak digunakan saat ini ditinjau dari dimensi,

kapasitas, sistem pemasangan dan jumlah poros roda penggerak yang digunakan disajikan pada Tabel 2.

Pada paper ini akan dibahas metode pemilihan model desain rangka untuk bogie monorel prototipe dari beberapa alternatif model desain yang didasarkan pada kriteria desain yang diinginkan. Dalam proses pemilihan pembobotan nilai dari masing-masing kriteria didasarkan pada nilai yang diberikan oleh pakar dalam bidangnya. Alternatif yang akan dipilih adalah model desain dari varian konsep desain yang sesuai dengan kriteria yang diinginkan.

Tujuan pemilihan adalah untuk menghasilkan suatu model desain yang cocok digunakan sebagai rangka bogie yang akan digunakan pada monorel prototipe sesuai dengan kriteria desain yang ditentukan. Model desain yang terpilih selanjutnya direkomendasikan untuk dikembangkan dan digunakan sebagai rangka bogie monorel yang akan digunakan.

Metode Penelitian

Seluruh varian konsep desain yang akan dipilih adalah model desain rangka bogie yang bisa digunakan pada bogie model dua poros roda penggerak dan bogie akan dipasang secara independen. Varian konsep rangka bogie monorel yang akan dipilih merupakan rangka yang dibentuk dari dua komponen rangka yaitu: rangka utama dan rangka samping.

Rangka utama yang berfungsi sebagai dudukan

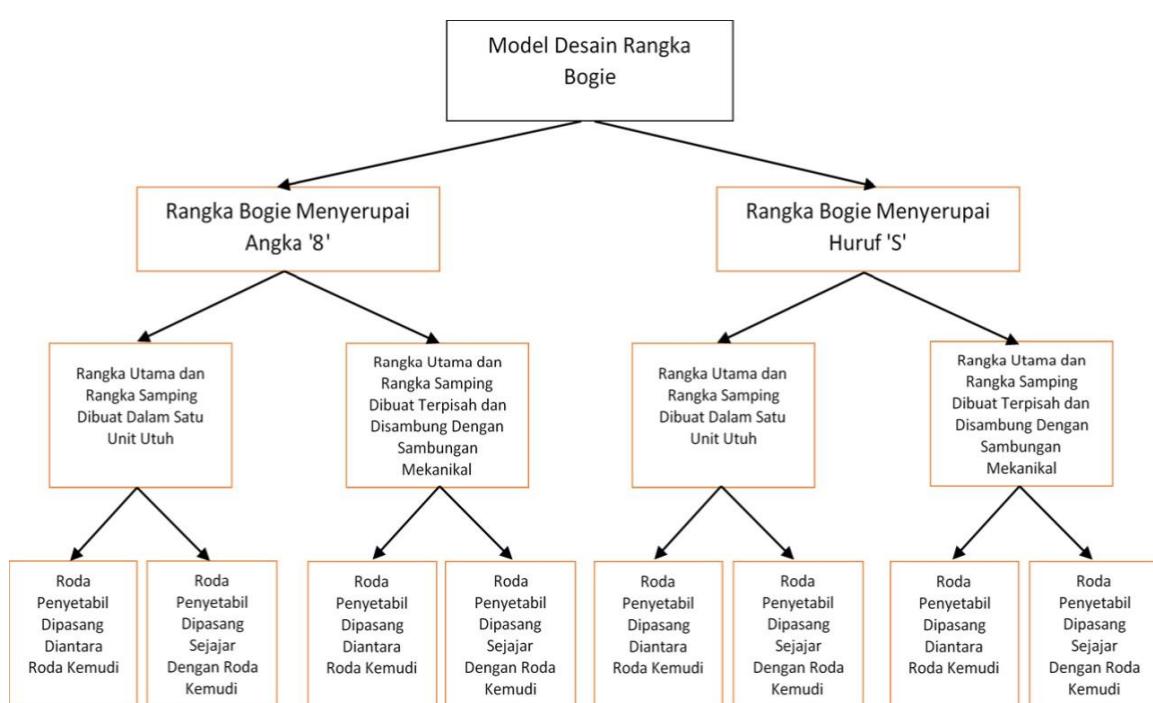
roda penggerak, sistem suspensi, boltsteer, motor penggerak, komponen penerus daya dan lain-lain. Sedangkan rangka samping berfungsi sebagai dudukan roda pengarah. Roda pengarah yang terdiri dari roda kemudi dan roda penyetabil dipasang disisi kiri dan kanan bogie.

Varian konsep terdiri dari delapan varian yang terbagi dalam dua kelompok varian konsep, kelompok varian konsep pertama adalah rangka utama dibuat menyerupai angka "8" dan kelompok varian konsep kedua adalah rangka utama dibuat menyerupai huruf "S".

Tiap kelompok rangka utama yang dibuat menyerupai angka "8" dan menyerupai huruf "S" masing-masing dibagi kembali dalam dua kelompok varian konsep yaitu kelompok varian dimana rangka utama dan rangka samping dibuat utuh dalam satu unit rangka, dan kelompok varian dimana rangka utama dan rangka samping dibuat secara terpisah, dan digabung menggunakan sambungan mekanikal.

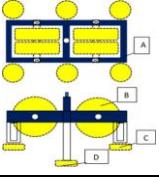
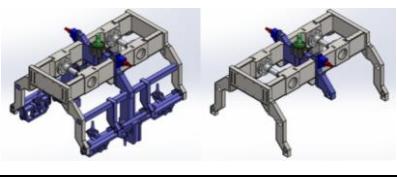
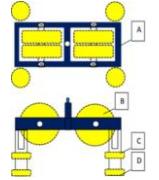
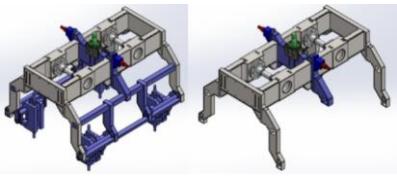
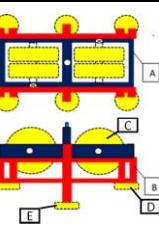
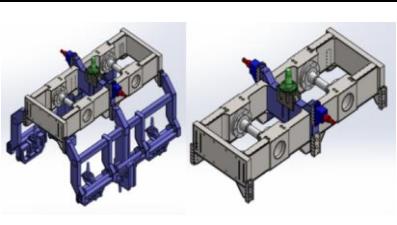
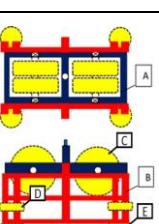
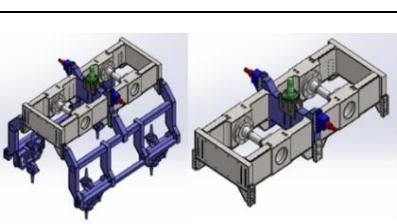
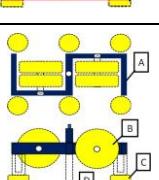
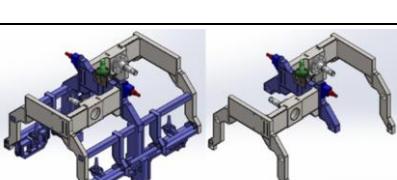
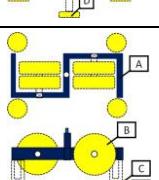
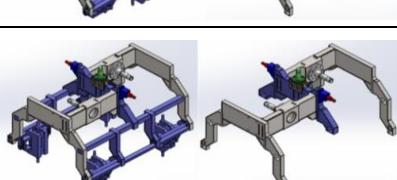
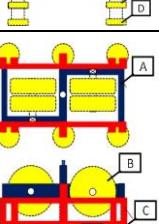
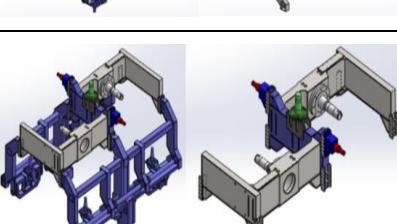
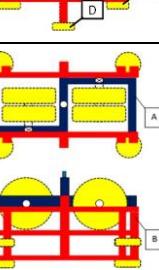
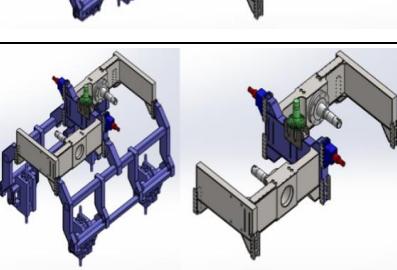
Dari empat kelompok varian konsep desain diatas masing-masing dibagi dalam dua varian model desain dalam pemasangan roda pegarah yaitu model pemasangan roda penyetabil dipasang diantara roda kemudi dan model pemasangan roda penyetabil dipasang sejajar dengan roda kemudi.

Pengelompokan varian konsep dapat dilihat pada Gambar 3. Total varian konsep yang menjadi alternatif model desain rangka untuk dipilih menjadi delapan varian konsep. Bentuk model tiap varian bisa dilihat pada Tabel 3.

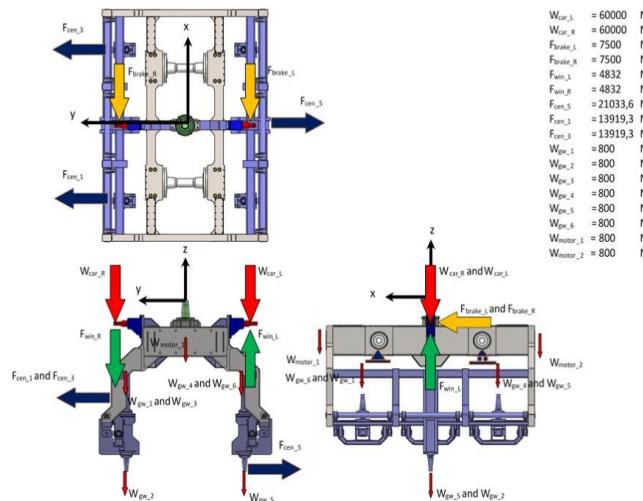


Gambar 3. Pengelompokan varian konsep

Tabel 3. Varian konsep model desain rangka bogie

Varian konsep	Skematik model	Model desain	Keterangan
konsep #1			Rangka Bogie menyerupai angka '8' Rangka utama dan rangka samping dibuat dalam satu unit utuh A. Main Frame B. Traction wheels C. Steering wheels D. Stabilizing wheels
konsep #2			Rangka Bogie menyerupai angka '8' Rangka utama dan rangka samping dibuat dalam satu unit utuh A. Main Frame B. Traction wheels C. Steering wheels D. Stabilizing wheels
konsep #3			Rangka Bogie menyerupai angka '8' Rangka utama dan rangka samping dibuat terpisah dan digabung dengan sambungan mekanikal A. Main Frame B. Side Frame C. Traction wheels D. Steering wheels E. Stabilizing wheels
konsep #4			Rangka Bogie menyerupai angka '8' Rangka utama dan rangka samping dibuat terpisah dan digabung dengan sambungan mekanikal A. Main Frame B. Side Frame C. Traction wheels D. Steering wheels E. Stabilizing wheels
konsep #5			Rangka Bogie menyerupai huruf 'S' Rangka utama dan rangka samping dibuat dalam satu unit utuh A. Main Frame B. Traction wheels C. Steering wheels D. Stabilizing wheels
konsep #6			Rangka Bogie menyerupai huruf 'S' Rangka utama dan rangka samping dibuat dalam satu unit utuh A. Main Frame B. Traction wheels C. Steering wheels D. Stabilizing wheels
konsep #7			Rangka Bogie menyerupai huruf 'S' Rangka utama dan rangka samping dibuat terpisah dan digabung dengan sambungan mekanikal A. Main Frame B. Side Frame C. Traction wheels D. Steering wheels E. Stabilizing wheels
konsep #8			Rangka Bogie menyerupai huruf 'S' Rangka utama dan rangka samping dibuat terpisah dan digabung dengan sambungan mekanikal A. Main Frame B. Side Frame C. Traction wheels D. Steering wheels E. Stabilizing wheels

Analisis kekuatan dari tiap varian konsep dilakukan dengan metoda elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak Ansys. Besar pembebana yang diberikan yang diberikan untuk model bogie dengan pemasangan roda penyetabil diantara roda kemudi (konsep #1, konsep #3, konsep #5, dan konsep #7) dapat dilihat pada Gambar 4. Sedangkan untuk model bogie dengan pemasangan roda penyetabil sejajar dengan roda kemudi (konsep #2, konsep #4, konsep #6, dan konsep #8) dapat dilihat pada pada Gambar 5. Hasil analisis FEM dari tiap varian konsep disajikan pada Tabel 4. Sedangkan besaran nilai yang diperoleh untuk tiap varian konsep disajikan pada Tabel 5.

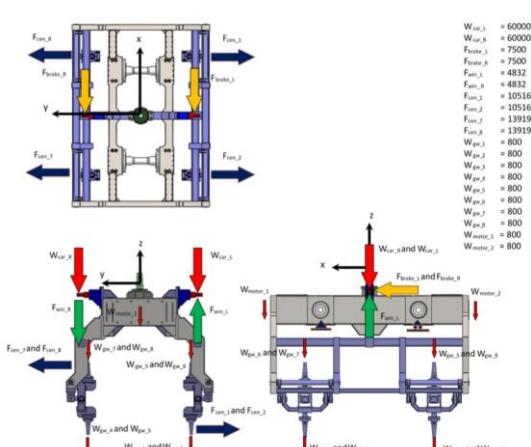


Gambar 4. DBB Varian konsep (konsep #1, konsep #3, konsep #5, dan konsep #7)

Analisis mobilisasi didasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya [5], pada penelitian tersebut disimpulkan model bogie dengan pemasangan roda penyetabil sejajar dengan roda kemudi memiliki mobilitas lebih baik dibanding dengan bogie dengan pemasangan roda penyetabil diantara roda kemudi disaat melewati lintasan belok. Dengan demikian varian konsep #2,

konsep #4, konsep #6, dan konsep #8 akan memiliki mobilisasi yang lebih baik disaat melewati lintasan belok dibanding varian konsep#1, konsep #3, konsep #5, dan konsep #7.

Analisis kemudahan pemasangan bogie pada kabin monorel dapat ditinjau dari bobot yang akan dipasang. Dalam analisis ini dari varian konsep yang dibuat dikelompokan dalam dua kelompok, kelompok pertama adalah bogie yang dibuat satu unit utuh atau digabung antara rangka bogie utama dan rangka bogie samping yaitu bogie konsep ke #1, konsep ke #2, konsep ke #5 dan konsep ke #6. Kelompok kedua adalah bogie yang dibuat terpisah antara rangka bogie utama dan rangka bogie



Gambar 5. DBB Varian konsep (konsep #2, konsep #4, konsep #6, dan konsep #8)

samping yaitu bogie konsep ke #3, konsep ke #4, konsep ke #7 dan konsep ke #8.

Dari dua kelompok tersebut maka kelompok pertama akan memiliki bobot yang lebih besar dibanding dengan kelompok kedua. Hal ini terjadi karena dua bagian rangka dibuat satu unit yang akan diangkat besamaan disaat proses pemasangan dilangsungkan. Hal ini sangat berbeda dengan

kelompok kedua, besar bobot yang akan diangkat akan dibagi dua yang terdiri dari bobot rangka utama dan bobot rangka samping.

Analisis kemudahan pemasangan komponen mudah aus / roda penggerak,. dalam analisis ini dari varian konsep yang dibuat dikelompokan dalam dua kelompok, kelompok pertama adalah bogie yang menggunakan rangka utama menyerupai angka "8" yaitu bogie konsep #1, konsep #2, konsep #3, dan konsep #4. Kelompok kedua adalah bogie yang menggunakan rangka utama menyerupai hurup "S" yaitu bogie konsep #5, konsep #6, konsep #7, dan konsep #8.

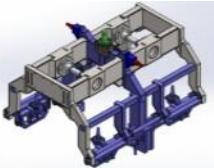
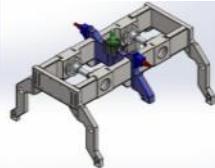
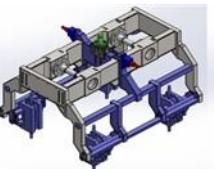
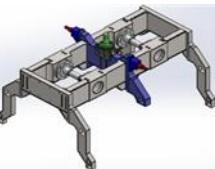
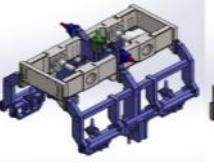
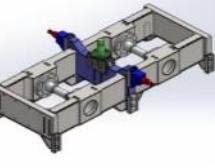
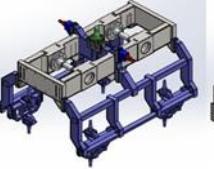
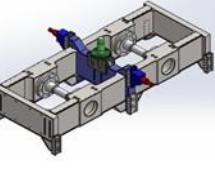
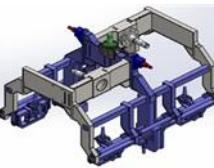
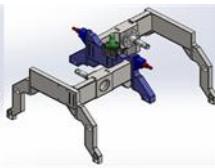
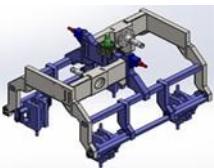
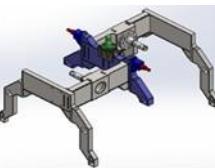
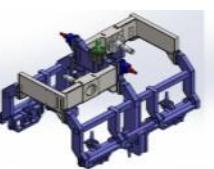
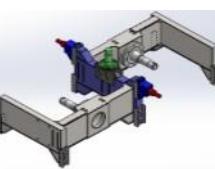
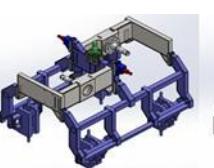
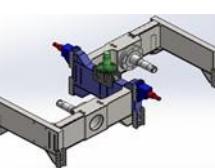
Dari dua kelompok tersebut maka kelompok kedua memiliki tingkat kemudahan yang lebih tinggi untuk proses bongkar pasang roda penggerak. Hal ini terjadi karena bentuk rangka yang digunakan memiliki area yang lebih luas untuk proses bongkar pasang tersebut.

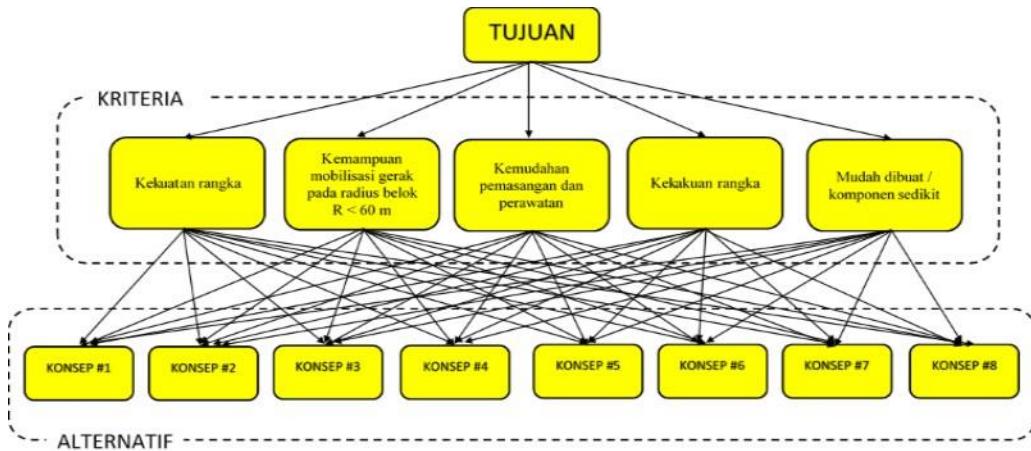
Proses pemilihan alternatif dari varian konsep dilakukan dengan metoda Analytical Hierarchy Process (AHP). Dalam metoda ini setiap elemen yang terdapat dalam hirarki harus diketahui bobot relatifnya. Hal ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kepentingan terhadap kriteria dan struktur hirarki atau sistem secara keseluruhan.

Tabel 4. Analisis FEM tiap varian konsep

Varian konsep	Model Desain	Sistem Pembebatan	Tegangan Von Misses	Faktor Kemanan Statik	Tegangan Alternating Ekivalen
konsep #1					
konsep #2					
konsep #3					
konsep #4					
konsep #5					
konsep #6					
konsep #7					
konsep #8					

Tabel 5. Analisis FEM tiap varian konsep

Varian konsep	Model Desain	Hasil Analisis FEM																				
konsep #1	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>157</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>185.72</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>484,179.88</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>2.0336</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>2.5576</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>20,894.74</td></tr> <tr><td></td><td>18.4380</td></tr> <tr><td></td><td>1,925.27</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	157	Tegangan Von Misses (MPa)	185.72	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	484,179.88	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	2.0336	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	2.5576	Berat rangka bogie (kg)	20,894.74		18.4380		1,925.27
Jumlah komponen (unit)	157																					
Tegangan Von Misses (MPa)	185.72																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	484,179.88																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	2.0336																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	2.5576																					
Berat rangka bogie (kg)	20,894.74																					
	18.4380																					
	1,925.27																					
konsep #2	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>147</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>191.85</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>55,038.82</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>2.0528</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>2.1876</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>520,029.25</td></tr> <tr><td></td><td>23.631</td></tr> <tr><td></td><td>1,847.24</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	147	Tegangan Von Misses (MPa)	191.85	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	55,038.82	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	2.0528	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	2.1876	Berat rangka bogie (kg)	520,029.25		23.631		1,847.24
Jumlah komponen (unit)	147																					
Tegangan Von Misses (MPa)	191.85																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	55,038.82																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	2.0528																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	2.1876																					
Berat rangka bogie (kg)	520,029.25																					
	23.631																					
	1,847.24																					
konsep #3	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>185</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>225.44</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>12,544,66.06</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>1.8990</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>2.0236</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>20,487.11</td></tr> <tr><td></td><td>27.783</td></tr> <tr><td></td><td>1,916.05</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	185	Tegangan Von Misses (MPa)	225.44	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	12,544,66.06	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	1.8990	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	2.0236	Berat rangka bogie (kg)	20,487.11		27.783		1,916.05
Jumlah komponen (unit)	185																					
Tegangan Von Misses (MPa)	225.44																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	12,544,66.06																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	1.8990																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	2.0236																					
Berat rangka bogie (kg)	20,487.11																					
	27.783																					
	1,916.05																					
konsep #4	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>169</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>221.8</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>42,731.55</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>1,251,344.23</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>1.8865</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>2.0103</td></tr> <tr><td></td><td>27.1780</td></tr> <tr><td></td><td>1,850.01</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	169	Tegangan Von Misses (MPa)	221.8	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	42,731.55	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	1,251,344.23	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.8865	Berat rangka bogie (kg)	2.0103		27.1780		1,850.01
Jumlah komponen (unit)	169																					
Tegangan Von Misses (MPa)	221.8																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	42,731.55																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	1,251,344.23																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.8865																					
Berat rangka bogie (kg)	2.0103																					
	27.1780																					
	1,850.01																					
konsep #5	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>157</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>240.68</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>7,146.46</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>233,736.45</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>1.7431</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>1.8575</td></tr> <tr><td></td><td>30,3930</td></tr> <tr><td></td><td>1,535.07</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	157	Tegangan Von Misses (MPa)	240.68	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	7,146.46	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	233,736.45	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.7431	Berat rangka bogie (kg)	1.8575		30,3930		1,535.07
Jumlah komponen (unit)	157																					
Tegangan Von Misses (MPa)	240.68																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	7,146.46																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	233,736.45																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.7431																					
Berat rangka bogie (kg)	1.8575																					
	30,3930																					
	1,535.07																					
konsep #6	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>147</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>236.89</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>9,948.25</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>372,688.89</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>1.8062</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>1.9248</td></tr> <tr><td></td><td>29.7310</td></tr> <tr><td></td><td>1,457.04</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	147	Tegangan Von Misses (MPa)	236.89	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	9,948.25	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	372,688.89	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.8062	Berat rangka bogie (kg)	1.9248		29.7310		1,457.04
Jumlah komponen (unit)	147																					
Tegangan Von Misses (MPa)	236.89																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	9,948.25																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	372,688.89																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.8062																					
Berat rangka bogie (kg)	1.9248																					
	29.7310																					
	1,457.04																					
konsep #7	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>171</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>237.24</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>9,799.40</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>557,934.23</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>1.1302</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>1.4916</td></tr> <tr><td></td><td>35.7250</td></tr> <tr><td></td><td>1,525.55</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	171	Tegangan Von Misses (MPa)	237.24	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	9,799.40	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	557,934.23	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.1302	Berat rangka bogie (kg)	1.4916		35.7250		1,525.55
Jumlah komponen (unit)	171																					
Tegangan Von Misses (MPa)	237.24																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	9,799.40																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	557,934.23																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.1302																					
Berat rangka bogie (kg)	1.4916																					
	35.7250																					
	1,525.55																					
konsep #8	 	<table> <tr><td>Jumlah komponen (unit)</td><td>155</td></tr> <tr><td>Tegangan Von Misses (MPa)</td><td>235.52</td></tr> <tr><td>Deformasi (mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Kekakuan (N/mm)</td><td>sumbu lateral sumbu vertikal</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan statik</td><td>13,032.15</td></tr> <tr><td>Faktor keamanan fatik (Goodman theory)</td><td>1.6458</td></tr> <tr><td>Tegangan alternating ekivalen (MPa)</td><td>1.3275</td></tr> <tr><td>Berat rangka bogie (kg)</td><td>650,373.46</td></tr> <tr><td></td><td>46.3510</td></tr> <tr><td></td><td>1,459.51</td></tr> </table>	Jumlah komponen (unit)	155	Tegangan Von Misses (MPa)	235.52	Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal	Faktor keamanan statik	13,032.15	Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	1.6458	Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.3275	Berat rangka bogie (kg)	650,373.46		46.3510		1,459.51
Jumlah komponen (unit)	155																					
Tegangan Von Misses (MPa)	235.52																					
Deformasi (mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Kekakuan (N/mm)	sumbu lateral sumbu vertikal																					
Faktor keamanan statik	13,032.15																					
Faktor keamanan fatik (Goodman theory)	1.6458																					
Tegangan alternating ekivalen (MPa)	1.3275																					
Berat rangka bogie (kg)	650,373.46																					
	46.3510																					
	1,459.51																					



Gambar 6. Hirarki AHP dalam pemilihan rangka bogie

Kriteria adalah dengan menyusun perbandingan pasangan, yaitu membandingkan dalam bentuk pasangan untuk seluruh kriteria disetiap sub-sistem hirarki. Perbandingan tersebut kemudian ditransformasikan dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan untuk analisis numerik.

Pengambilan keputusan dengan metoda AHP menggunakan nilai dari persepsi pengambil keputusan (*decision maker*) atau *expert* sebagai inputnya, maka ketidak konsistenan nilai yang diberikan sangat mungkin terjadi. Penentuan konsistensi dari didasarkan atas *eigen value maksimum*. Nilai *eigen value maksimum* didefinisikan dengan persamaan.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (1)$$

CI adalah rasio penyimpangan konsistensi (*consistency indeks*), λ_{\max} adalah nilai *eigen* terbesar dari matriks berordo n . Jika nilai *CI* sama dengan nol, maka matriks *pairwise comparison* tersebut konsisten, batas ketidakkonsistensi (*inconsistency*) ditetapkan pada Tabel 6 yang didefinisikan dengan rasio konsistensi (*CR*), yaitu perbandingan indeks konsistensi dengan nilai random indeks (*RI*). Rasio konsistensi didefinisikan dengan persamaan.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Jika matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison*) dengan nilai *CR* lebih kecil dari 0,10 atau 10 % maka ketidakkonsistensi pendapat pengambil keputusan masih dapat diterima dan jika

tidak maka proses penilaian perlu diulang kembali.

Proses penyeleksian varian konsep untuk rangka bogie monorel alternatif yang dijadikan pilihan adalah Konsep #1, Konsep #2, Konsep #3, Konsep #4, Konsep #5, Konsep #6, Konsep #7, dan Konsep #8.

Kriteria pemilihan dari varian alternatif konsep desain adalah sebagai berikut:

- Kekuatan rangka
 - Nilai tegangan ekivalen maksimum (Von Misses) harus relatif kecil
 - Nilai faktor keamanan statik harus relatif besar
 - Nilai faktor keamanan fatik harus relatif besar
 - Nilai tegangan alterniring ekivalen maksimum harus relatif kecil
- Bentuk rangka harus memiliki bentuk untuk meningkatkan kemampuan mobilisasi gerak pada radius belok $R \leq 60$ m
- Bentuk rangka harus memiliki kemudahan pemasangan dan perawatan
 - Bentuk rangka memiliki kemudahan pemasangan dan perawatan
 - Pemasangan unit rangka pada chassis kabin relatif mudah dilakukan
 - Bongkar pasang roda penggerak relatif mudah dilakukan
- Kekakuan rangka
 - Nilai perpindahan (*displacement*) pada sumbu x (arah lateral) harus relatif kecil
 - Nilai perpindahan (*displacement*) pada sumbu y (arah vertikal) harus relatif kecil
 - Nilai kekakuan (*stiffness*) pada sumbu x

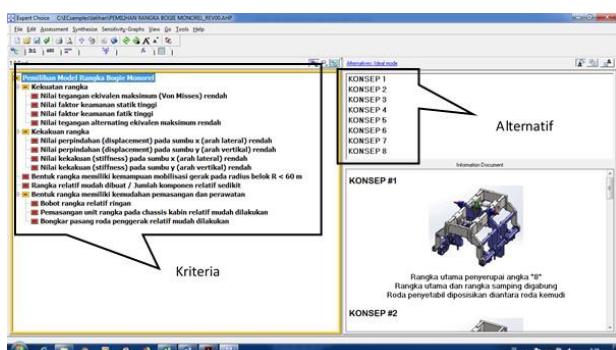
Tabel 6. Indek nilai random (RI) [6].

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,48

- (arah lateral) harus relatif kecil
- Nilai kekakuan (*stiffness*) pada sumbu y (arah vertikal) harus relatif kecil
- Rangka harus relatif mudah dibuat/Jumlah komponen relatif sedikit

AHP dalam pemilihan model rangka bogie dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *Expert Choice*. Program aplikasi ini dapat menggabungkan hasil perbandingan dengan jumlah lebih dari satu partisipan pembuat persepsi dari alternatif yang akan dipilih. Kesimpulan akhir diambil dari nilai rata-rata persepsi yang diberikan.

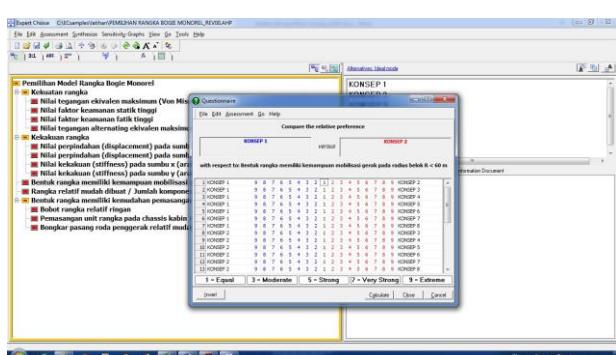
Tahap akhir yang dilakukan adalah melakukan analisa sensitifitas. Analisis ini digunakan untuk mengecek pengaruh perubahan nilai kepentingan suatu kriteria terhadap peringkat alternatif yang tersedia.



Gambar 7. Proses AHP pemilihan rangka bogie pada perangkat lunak *Expert Choice*.

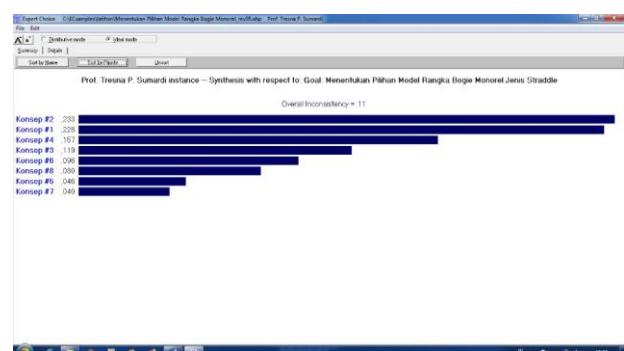
Hasil dan Pembahasan

Dalam analisis pemilihan model rangka bogie penilaian dilakukan oleh tiga orang *experts*. Tiap *experts* memberikan nilai pembobotan dari tiap kriteria dari beberapa alternatif konsep yang akan dipilih.

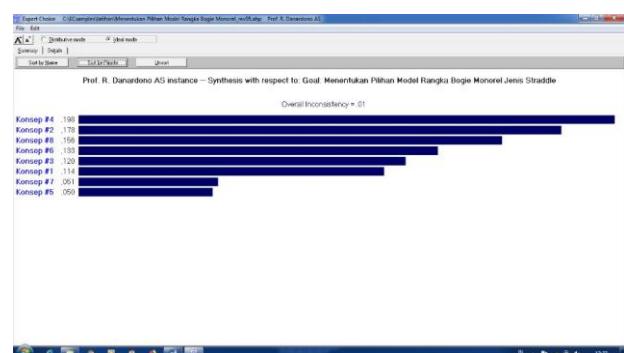


Gambar 8. Proses penilaian satu kriteria dari dua alternatif yang akan dipilih

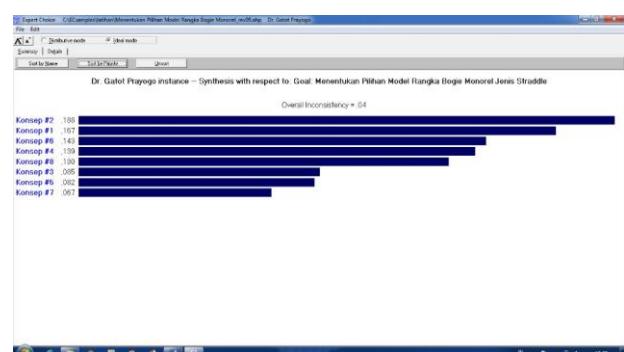
Hasil kombinasi penilaian dari tiga orang *experts* tersebut merupakan solusi dari pemilihan alternatif konsep yang akan dipilih. Penilaian *experts* yang memiliki nilai ketidak konsistensian (*inconsistency*) dalam penilaian kurang dari 10% ($< 0,1$) adalah nilai dari penilaian *experts* yang akan dikombinasikan, dalam mendefinisikan alternatif konsep yang akan dipilih. Hasil analisis yang diberikan oleh tiga orang expert disajikan pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 11.



Gambar 9. Hasil penilaian *experts* pertama



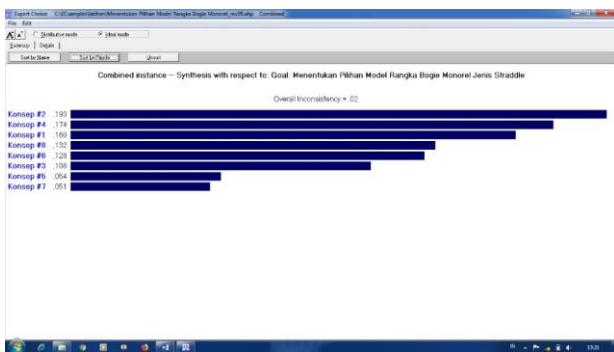
Gambar 10. Hasil penilaian *experts* kedua



Gambar 11. Hasil penilaian *experts* ketiga

Dari hasil penilaian ketiga *experts* diperoleh dua *experts* memberikan nilai dengan ketidakkonsistensi penilaian kurang dari 10 %, sedangkan satu *experts* lainnya memberikan nilai

dengan ketidakkonsistenan lebih dari 10 %. Sehingga untuk menentukan nilai akhir dalam menentukan alternatif konsep yang akan dipilih ditentukan dari kombinasi dua *experts* yang memberikan nilai dengan ketidakkonsistenan dalam penilaian kurang dari 10%. Kombinasi nilai yang diberikan oleh expert dengan ketidak konsistenan penilaian kurang dari 10 % disajikan pada Gambar 12.



Gambar 15. Hasil kombinasi penilaian para *experts*

Dari hasil analisis diperoleh alternatif konsep dengan nilai tertinggi adalah alternatif konsep ke #2. Hasil penilaian yang diberikan merupakan bentuk rekomendasi atau usulan yang diberikan oleh *experts* dalam menentukan pilihan dari beberapa alternatif konsep yang diajukan yang dipilih berdasarkan beberapa kriteria yang sudah ditentukan. Konsep #2 adalah konsep desain rangka bogie yang diusulkan untuk digunakan pada bogie yang akan digunakan pada prototipe monorel yang ada.

Jika dilihat dari kriteria pemilihan yang ditentukan salah satu kriteria adalah kemudahan dalam proses bongkar pasang roda penggerak. Bentuk rangka konsep #2 adalah bentuk yang menyerupai angka "8", bentuk ini adalah bentuk yang dianggap cukup sulit untuk melakukan proses bongkar pasang roda penggerak dibanding bentuk rangka yang menyerupai huruf "S". Sehingga untuk mengakomodir kriteria tersebut perlu dirancang suatu mekanisme sistem pengikat roda penggerak sehingga proses bongkar pasangnya mudah dilakukan.

Kesimpulan

Metode AHP dapat digunakan untuk memilih model desain dari beberapa konsep desain dengan kriteria pemilihan yang sudah ditentukan.

Hasil pemilihan model rangka bogie dari delapan alternatif konsep dengan menggunakan metode AHP dipilih alternatif konsep #2 yang

diusulkan untuk digunakan sebagai model rangka bogie monorel.

Konsep #2 adalah konsep model desain rangka bogie dengan rangka utama menyerupai angka "8" dengan roda penyetabil dipasang sejajar dengan roda kemudi.

Dilihat dari kriteria yang ditentukan, konsep ke #2 masih belum memenuhi kriteria kemudahan proses bongkar pasang roda penggerak. Sehingga untuk mengakomodir kriteria tersebut perlu dirancang mekanisme sistem pengikat roda penggerak sehingga proses bongkar pasang roda tersebut mudah dilakukan.

Penghargaan

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi RI yang telah membiayai penelitian ini.

Referensi

- [1] EN 13749:2011: "Railway applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames", CEN Brussels; 2011
- [2] Kevin N Otto (2001), "Product Desain Technique in Reverse Engineering and New Product Development", Prentice Hall, 2001
- [3] Jekki Hendrawan (2013), "Analisa Kekuatan Struktur Bogie Monorel Kapasitas 12 Ton dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga", Thesis Program Magister Teknik Mesin Universitas Indonesia (in Bahasa Indonesia).
- [4] Ryan R. Kennedy (2004), Considering Monorail Rapid Transit for North American Cities.
- [5] Danardono A.S, et all, Preliminary Analysis in the Improvement Turning Abilities In Design of The Monorail Bogie PT. MBW Indonesia, Applied Mechanics and Materials Vol. 663 (2014) pp 539-543
- [6] Thomas L. Saaty (2012), "Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process", Second Edition, Springer Science+Business Media, New York.