

Analisis Material Ringan pada *Bus Body Frame* Battery Electric Vehicle Bus PUI SKO ITS dengan Metode Elemen Hingga

Khadif Gicha Alifio, Julendra Bambang Ariatedja dan Bambang Sudarmanta
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ariatedja@me.its.ac.id

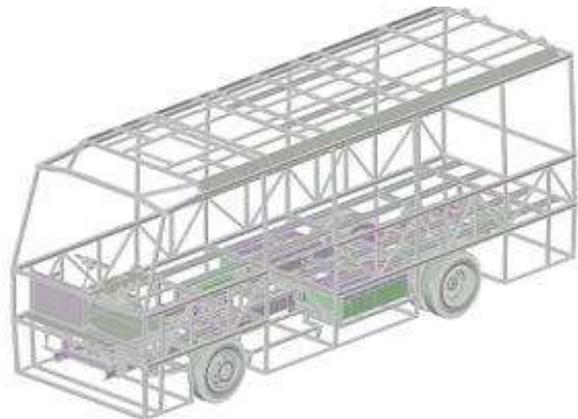
Abstrak—Penggunaan material ringan alternatif untuk *bus body frame* pada *battery electric vehicle bus* dapat meningkatkan efisiensi kendaraan. Hal ini dikarenakan berat kendaraan akan berkurang yang akan membuat gaya hambat kendaraan ketika berjalan semakin kecil. Perubahan material pada *bus body frame* berpengaruh pada kekuatan dan safety kendaraan. Dengan begitu perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui kekuatan dan keamanan kendaraan. Dengan menggunakan uji simulasi *rollover* untuk safety dan uji beban statis serta beban kendaraan ketika bergerak dinamis, maka akan didapatkan hasil penelitian berupa kelayakan penggantian material. Serta dilakukan pula perhitungan *economic fuel savings* akibat pergantian material. Dengan dipilih 3 material alternatif dan material *carbon steel* sebagai *base material*. Pemilihan material mengikuti *Ashby chart*. Dengan mengganti material menjadi material ringan, dilakukan simulasi dengan beban statis, beban berbelok kearah kiri, kanan, dan saat melakukan pengereman. Didapatkan hasil simulasi bahwa penggantian material membuat tegangan maksimum yang terjadi meningkat dan menurun pada kasus tertentu. Dengan nilai maksimum sebesar 231.15 MPa dan defleksi terbesar sebesar 23.326 mm. Dilakukan pula uji *rollover* dengan standard yang di acu adalah UNECE R-66. Didapatkan hasil simulasi berupa defleksi yang mana material alternatif *aluminum* dan *titanium* memenuhi standard sementara untuk material *magnesium* melebihi *safety area* pada standard UNECE R-66.

Kata Kunci—*Bus Body Frame*, Kekuatan, Safety, Material Ringan, *Economic Fuel Savings*.

I. PENDAHULUAN

PENGGUNAAN bahan bakar fosil bagi moda transportasi sangatlah buruk bagi lingkungan dimana gas hasil pembakaran berperan besar bagi perubahan iklim. Alternatifnya adalah dengan menggunakan kendaraan elektrik. Kendaraan elektrik memiliki batasan jarak tempuh berupa energi yang tersimpan pada baterai. Untuk menambah efisiensi dan jarak tempuh, dapat dilakukan pengurangan berat kendaraan. Cara untuk mengurangi berat kendaraan adalah mengganti material pada salah satu strukturnya. Pengurangan berat juga akan diperoleh *savings* sebagai akibat meningkatnya efisiensi

Penggantian material menjadi material ringan mengakibatkan perbedaan karakteristik pada struktur kendaraan. Hal ini dikarenakan oleh perbedaan karakteristik material yang dipengaruhi oleh *young's modulus*, *density*, dan *yield strength* dari material. Dengan perubahan yang akan dilakukan adalah pada *bus body frame* maka perlu dilakukan analisis untuk mendapatkan apakah material yang diaplikasikan dapat memenuhi standard keamanan dan *safety* yang ada. Analisis keamanan akan dilakukan dengan



Gambar 1. Desain battery electrical vehicle PUI SKO-ITS.

memberikan beban statis, beban kendaraan ketika berbelok, dan pengerem. Analisis *safety* akan mengacu pada standard UNECE R-66 dimana terdapat *safety area* ketika dilakukan uji guling.

Dengan menggunakan *BEV bus* yang telah dilakukan modifikasi *lay-out* dan analisis peformansi pada PUI SKO-ITS, maka pada penelitian ini disusun rumusan masalah yaitu bagaimana kekuatan material alternatif pada pembebanan statis dan beban ketika kendaraan bergerak secara dinamis, serta bagaimana kekuatan material alternatif ketika dilakukan uji *crash rollover* atau guling. Analisis dilakukandengan menggunakan metode elemen hingga atau *numerical analysis*.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Design BEV Bus

Design BEV bus yang digunakan adalah *design BEV bus* yang telah dimodifikasi pada PUI SKO-ITS. *Design BEV bus* tersebut merupakan *design BEV bus* hasil *retrofit* dari *internal combustion engine bus*. Design tersebut memodifikasi beberapa komponen *ICE bus* dengan menambahkan tempat baterai pada tengah *chassis* dan *side pod* kanan dan kiri. Serta membuat perubahan mengikuti perubahan komponen yang digunakan. Desain battery electrical vehicle tertera pada Gambar 1.

B. Material Alternatif Ringan

Material ringan yang digunakan sebagai material alternatif untuk *bus body frame* dipilih 3 material alternatif yaitu *magnesium alloy AZ80A*, *titanium alloy Ti6Al4V*, dan *aluminum alloy 6061* dan material awal yaitu *carbon steel* [1]. Material tersebut memiliki karakteristik yang berbeda yang mana pemilihan tersebut memiliki perbedaan atau

Tabel 1.

Material properties yang digunakan

No	Material	Properties		
1	Carbon Steel AISI 1045	Young's Modulus	200	GPa
		Density	7,85	g/mm ³
		Yield Strength	415	MPa
2	Aluminum Alloy 6061	Young's Modulus	71,7	GPa
		Density	2,81	g/mm ³
		Yield Strength	462	MPa
3	Magnesium Alloy AZ80A	Young's Modulus	45	GPa
		Density	1,8	g/mm ³
		Yield Strength	250	MPa
4	Titanium Alloy Ti6Al4V	Young's Modulus	114	GPa
		Density	4,42	g/mm ³
		Yield Strength	830	MPa

Tabel 2.

Beban yang ditopang struktur bus

No	Komponen	Berat	
1	Battery tengah	168,0	Kg
2	Battery samping	182,7	Kg
3	Motor	134,0	Kg
4	AC	1.940,0	Kg
5	Penumpang	130,0	Kg

Tabel 3.

Nilai percepatan tiap variasi material

No	Material	Arah Percepatan		
1	Steel Bus	Lateral	7,66	m/s ²
		Braking	13,95	m/s ²
2	Aluminum Bus	Lateral	7,34	m/s ²
		Braking	13,81	m/s ²
3	Magnesium Bus	Lateral	7,25	m/s ²
		Braking	13,75	m/s ²
4	Titanium Bus	Lateral	7,42	m/s ²
		Braking	13,89	m/s ²

variasi pada *young's modulus* terkecil hingga terbesar namun tidak terdapat *young's modulus* material yang diatas *carbon steel*. Material properties yang digunakan tertera pada Tabel 1.

Material tersebut akan diaplikasikan pada *side structure*, *roof structure* dan *side pod BEV bus* yang mana adalah seperti Gambar 2.

C. Analisis Beban Kendaraan

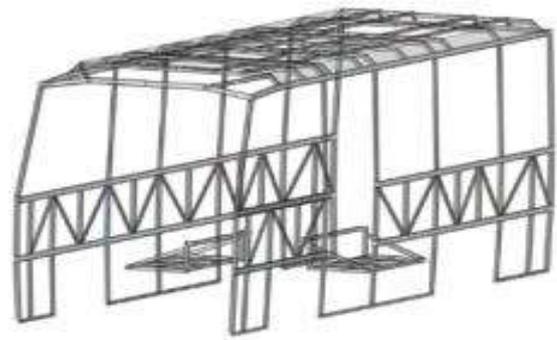
Beban-beban yang diaplikasikan pada kendaraan pada saat kondisi statis dihitung dengan menghitung berat beban yang ditumpu kendaraan ketika dalam kondisi diam. Beban tersebut berupa komponen elektrik, penumpang, dan komponen pendukung lainnya. Dengan mengasumsikan komponen elektrik bermassa rendah, maka beban yang ditopang oleh struktur seperti pada Tabel 2.

D. Analisis Beban Kendaraan

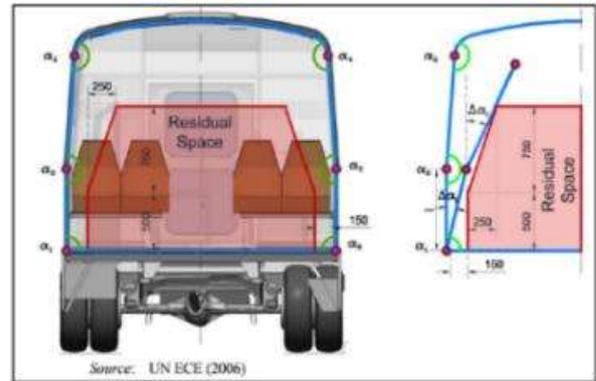
Beban dinamis dengan menggunakan asumsi kendaraan berada pada kondisi jalanan lurus ketika berbelok dan mengerem, dihitung secara manual dengan persamaan gaya yang mengacu pada referensi [2-3]. Gaya-gaya yang terjadi ketika mobil berbelok diambil dari kondisi kendaraan berbelok dengan kecepatan maksimum yang dianalisis pada kondisi skid dan guling. Dengan persamaan kecepatan maksimum adalah sebagai berikut:

$$Vsmax = \sqrt{\mu \cdot R \cdot g} \tag{1}$$

$$Vgmax = \sqrt{\frac{R \cdot g \cdot t}{2h}} \tag{2}$$



Gambar 2. Desain struktur bus yang dirubah materialnya.



Gambar 3. Safety area UNECE R-66.

Dimana μ adalah koefisien gesek antara jalan dan roda, g adalah percepatan gravitasi, R adalah radius belokan dan h adalah jarak titik pusat massa dengan ban dengan arah samping. Kecepatan maksimum tersebut akan digunakan sebagai perepatan kearah lateral dengan melakukan kesetimbangan gaya kearah samping.

Beban ketika kendaraan melakukan pengereman didapat dengan mengacu pada referensi [2-3] yang mana merupakan kestimbangan gaya hambat kendaraan dengan persamaan sebagai berikut.

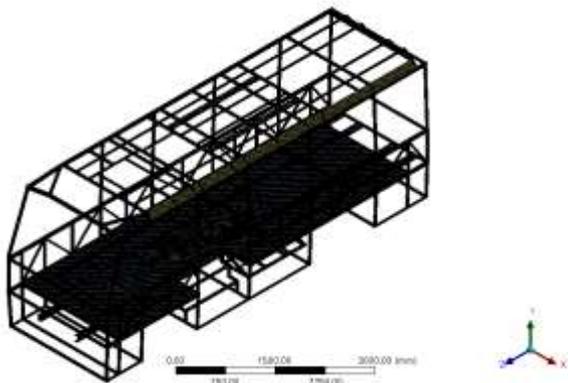
$$Fres = Fbr + Fbf + Rf + Rr + Fd \tag{3}$$

Dengan Fbr dan Fbf adalah gaya pengereman ban depan dan belakang, Rf dan Rr adalah *rolling resistance* ban depan dan belakang dan Fd adalah gaya hambat aerodinamis. Dengan didapatkan $Fres$ atau gaya hambat maksimum ketika pengereman, maka akan didapatkan perlambatan maksimum kendaraan ketika melakukan pengereman.

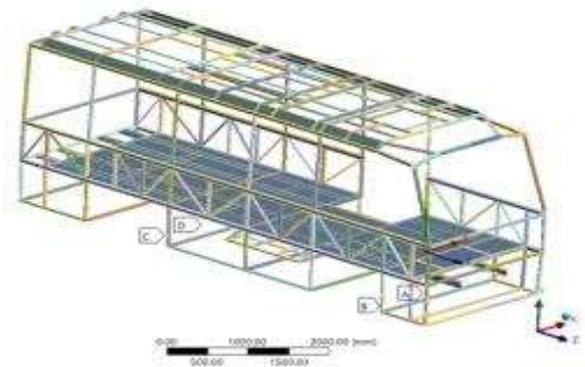
Dengan nilai berat bus yang berbeda pada tiap variasi material ringan, maka didapatkan nilai percepatan yang berbeda pula pada tiap variasi material. Dengan hasil perhitungan analisis beban sebagai percepatan pada Tabel 3.

E. Standard Rollover Test (UNECE R-66)

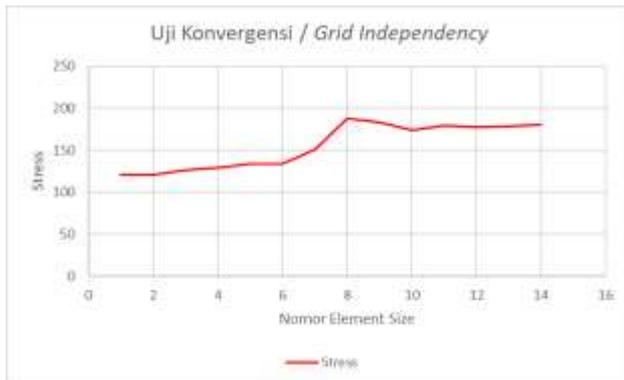
Uji *rollover* dilakukan untuk mengetahui *safety* atau keamanan kendaraan ketika bus terguling. Metode analisis *finite element method* untuk uji guling menggunakan permodelan *quasi-static* sebagaimana mengacu pada referensi [4-6]. Hal ini dilakukan untuk mempercepat waktu simulasi yang lama apabila dilakukan menggunakan permodelan *explicit dynamics*. Dengan *standard* untuk keamanan uji *rollover* mengikuti *UNECE R-66*. Yang mana pada *standard* ini terdapat *safety area* yang membatasi defleksi maksimum struktur apabila dilakukan uji guling.



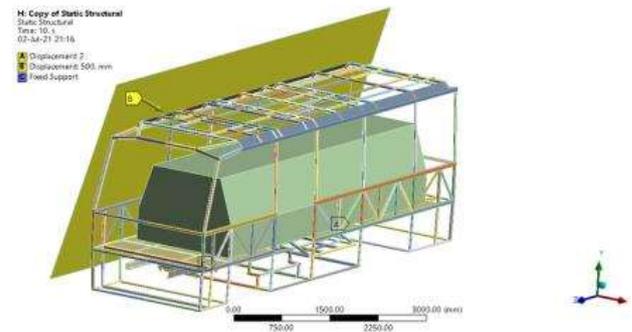
Gambar 7. Hasil diskritisasi model battery electrical vehicle bus.



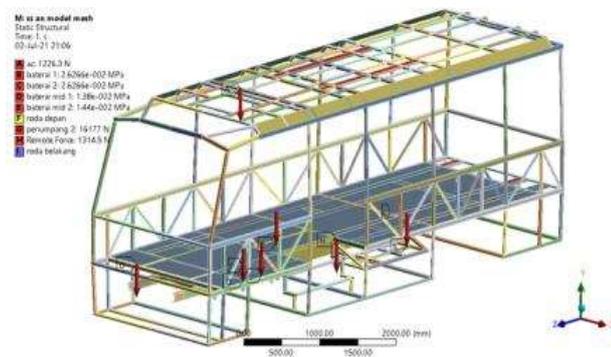
Gambar 4. Boundary condition support simulasi.



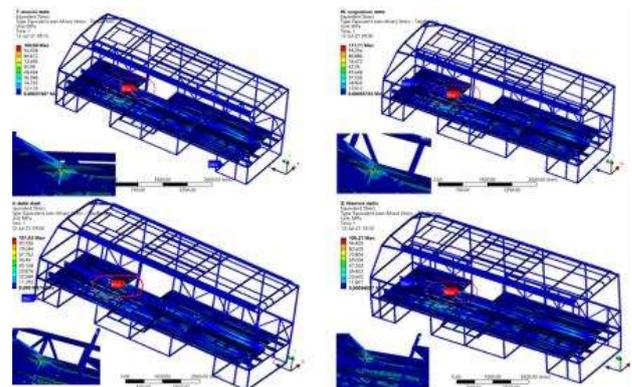
Gambar 8. Hasil uji konvergensi atau *grid independency test*.



Gambar 5. Boundary condition simulasi *rollover*.



Gambar 9. Set-up simulasi uji kekuatan.



Gambar 6. Distribusi tegangan hasil simulasi bus kondisi statis.

Dengan *safety area* tertera pada Gambar 3.

Pada *standard* tersebut, juga didapatkan bahwa energi yang dapat diserap oleh *struktur* adalah sebesar 75% dari total energi ketika kendaraan terguling. Hal ini digunakan sebagai acuan ketika dilakukan uji guling.

$$E_T = 0,75 \cdot M \cdot g \cdot \Delta h \tag{4}$$

Dengan E_T adalah energi yang terserap, M adalah massa kendaraan total, g merupakan percepatan gravitasi dan Δh merupakan ketinggian awal uji guling

III. METODE PENELITIAN

A. Diskritisasi Model Penelitian

Analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan menggunakan *finite element method* yang mana design *BEV bus* harus dilakukan proses diskritisasi. Proses diskritisasi dilakukan dengan cara mengkonversi model menjadi *surface modelling* untuk mempercepat waktu simulasi. Metode diskritisasi yang dilakukan adalah dengan cara *local meshing*

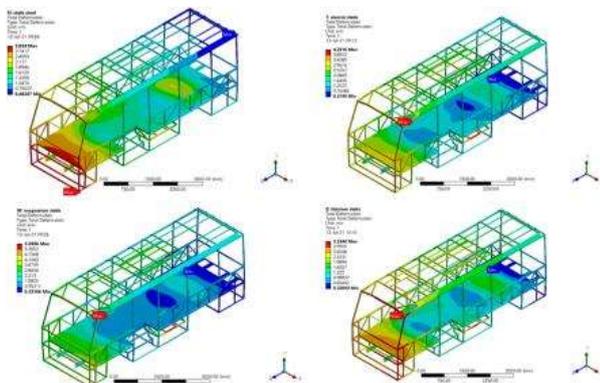
dengan bentuk *mesh* adalah *hexa* dan *prism mesh*. Hal ini dilakukan untuk menjaga kualitas *mesh* berada pada klasifikasi “*very good*” pada *mesh quality chart* mengacu pada referensi. Didapatkan hasil diskritisasi yang tertera pada Gambar 4.

Setelah dilakukan proses diskritisasi, perlu dilakukan uji konvergensi yang mana bertujuan sebagai uji untuk mengetahui apakah hasil simulasi yang didapat masih bergantung pada besarnya diskritisasi atau tidak. Dengan menggunakan salah satu variasi pada penelitian, didapatkan nilai uji diskritisasi yang tertera pada Gambar 5.

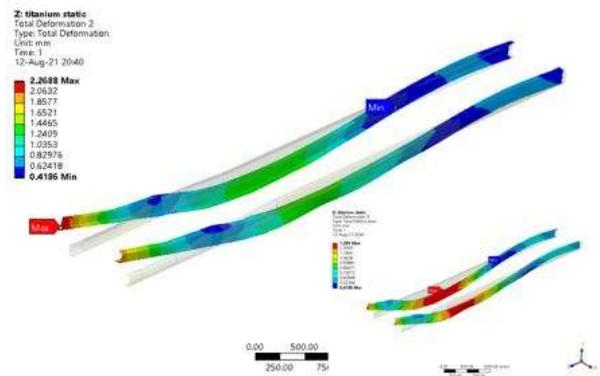
Dengan hasil yang didapat pada Gambar 5, maka digunakan diskritisasi dengan nomor *element size* 11 atau dengan ukuran 22 mm. Hal ini dikarenakan hasil simulasi dengan *element size* yang lebih kecil tidak menunjukkan perubahan yang signifikan.

B. Boundary Condition Uji Kekuatan

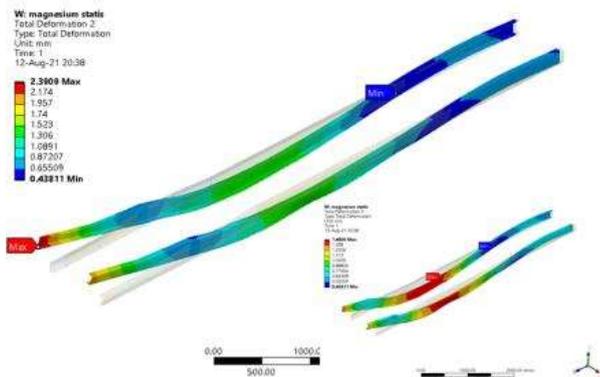
Uji kekuatan bertujuan untuk mengetahui kekuatan dari *struktur* ketika diberikan pembebanan. Metode yang digunakan yaitu pembebanan statis dan mengacu pada referensi [7]. Dengan melakukan *input boundary condition*



Gambar 10. Distribusi deformasi hasil simulasi bus kondisi statis.



Gambar 11. Deformasi chassis dengan bus body frame titanium.



Gambar 12. Deformasi chassis dengan bus body frame magnesium.

adalah berupa gaya-gaya akibat berat penumpang, dan komponen elektrik berupa motor, AC, dan juga *battery*. Komponen elektrik dengan massa ringan diabaikan sebagai sebuah asumsi. Gambar 6 menunjukkan gambar set-up simulasi uji kekuatan.

C. *Boundary Condition Support*

Boundary condition berupa *support* berfungsi sebagai tumpuan ketika dilakukan simulasi. Dengan uji kekuatan dan *safety* tumpuan yang digunakan adalah keempat roda kendaraan. Dengan menggunakan model pada *finite element method* berupa *remote displacement* dengan x,y,z-axis dikunci untuk roda belakang dan x,y-axis yang dikunci pada roda depan. Simulasi pada bagian ini tertera pada Gambar 7.

D. *Boundary Condition Uji Rollover*

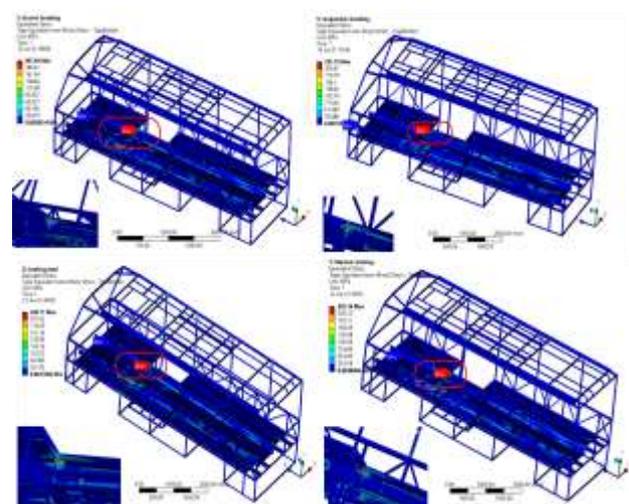
Uji rollover atau guling dilakukan untuk mengetahui keamanan kendaraan apabila terjadi *crash guling*. Dengan merujuk pada metode *quasi-static* yang mengacu pada referensi [4-6]. Dengan menggunakan *displacement* sebagai *boundary condition* yang akan didapatkan *force reaction*

Tabel 4.
Pengurangan massa bus akibat penggunaan material ringan

No	Material	Massa Total	Pengurangan	Persentase
1	Steel Bus	5.944,7 Kg	0 Kg	0,00%
2	Aluminium Bus	5.631,6 Kg	313,05 Kg	5,27%
3	Magnesium Bus	5.568,9 Kg	375,79 Kg	6,32%
4	Titanium Bus	5.731,6 Kg	213,05 Kg	3,58%

Tabel 5.
Nilai penambahan energi yang dibutuhkan dan *savings* setiap 100 km

No	Material	kWh/100 km	Penambahan Efisiensi	Saving/100 km
1	Steel Bus	73,85	0,00%	Rp. 0.00
2	Aluminium Bus	70,44	4,62%	Rp. 5.624,50
3	Magnesium Bus	69,76	5,54%	Rp. 6.751,63
4	Titanium Bus	71,53	3,14%	Rp. 3.827,80



Gambar 13. Distribusi tegangan hasil simulasi bus kondisi mengerem.

serta defleksi yang terjadi. Simulasi pada bagian ini tertera pada Gambar 8.

IV. HASIL DAN DISKUSI

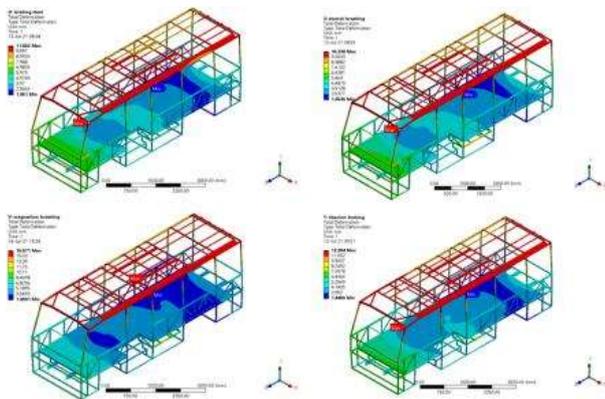
Berikut pembahasan hasil analisis pengurangan berat serta *fuel economy* dan juga hasil simulasi kekuatan dan *safety* yang telah dilakukan.

A. *Hasil Pengurangan Berat dan Fuel Economy*

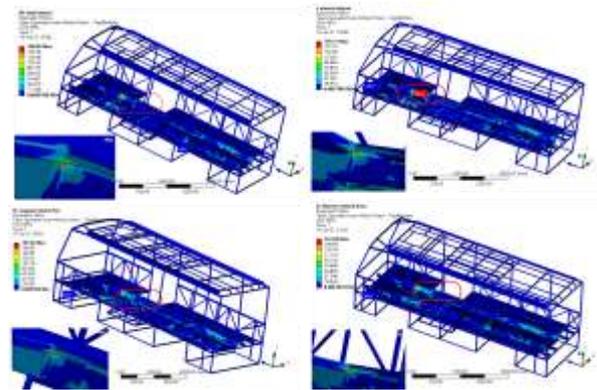
Dengan menggunakan material ringan pada struktur didapatkan distribusi berat yang tertera pada Tabel 4.

Pengurangan berat tersebut mengakibatkan penambahan efisiensi yang mana membuat pengurangan *fuel* yang digunakan kendaraan untuk berjalan. Dengan mengasumsikan kendaraan berjalan pada jalanan lurus, kecepatan konstan sebesar 40 km/jam dan listrik dengan harga Rp. 1.600/kWh. Didapatkan hasil *fuel economy saving* seperti pada Tabel 5.

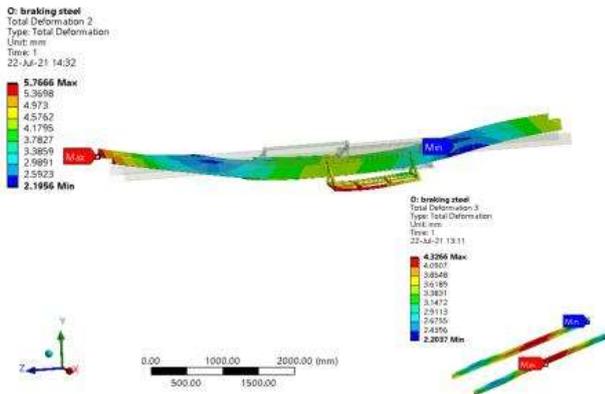
Savings atau penghematan yang terjadi akibat dari penambahan efisiensi tidak begitu signifikan apabila bus hanya digunakan pada jarak tempuh yang pendek. Namun apabila bus digunakan untuk perjalanan jauh yang mana bus merupakan kendaraan umum yang beroperasi setiap harinya, untuk jarak antar kota, maka *savings* tersebut adalah nilai yang besar.



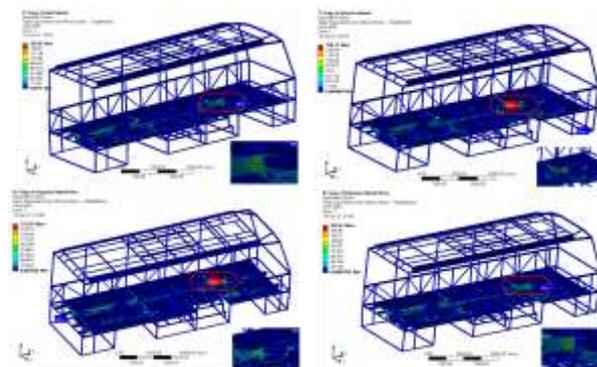
Gambar 17. Distribusi deformasi hasil simulasi bus kondisi mengerem.



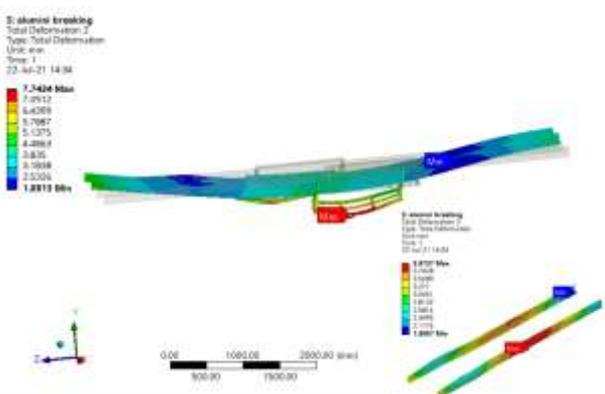
Gambar 14. Distribusi tegangan hasil simulasi bus kondisi berbelok ke kanan.



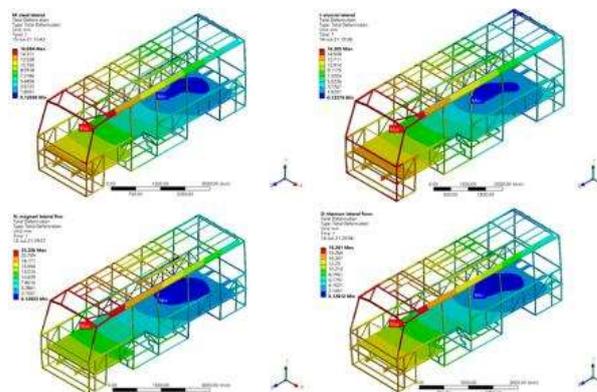
Gambar 18. Deformasi chassis dengan bus body frame steel kondisi braking.



Gambar 15. Distribusi tegangan hasil simulasi bus kondisi berbelok ke kiri.



Gambar 19. Deformasi chassis dengan bus body frame aluminum kondisi braking.z



Gambar 16. Distribusi deformasi pada kondisi berbelok kearah kanan.

B. Hasil Simulasi Kekuatan Bus

Dengan melakukan simulasi dengan *finite element methods*, pada kondisi statis. Didapatkan hasil simulasi pada Gambar 9.

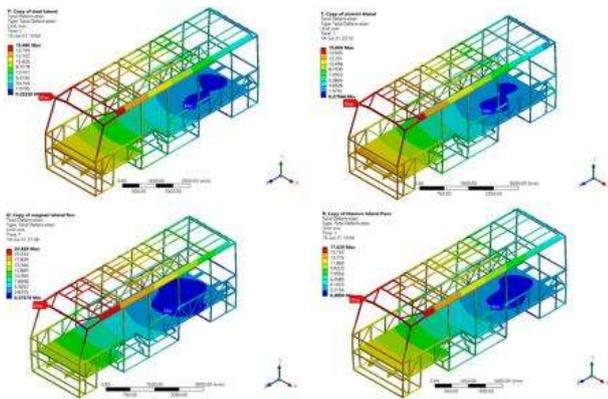
Dari hasil tersebut, didapatkan bahwa perubahan material ringan akan mempengaruhi tegangan maksimum yang terjadi. Terdapat kenaikan tegangan maksimum tertinggi sebesar 10,08 MPa atau 9,92% yaitu pada variasi material *magnesium alloy* dari material *steel* dengan nilai awal 101,63 MPa. Tegangan maksimum pada variasi material ringan lain juga mengalami kenaikan yaitu 7,41 MPa pada *aluminum alloy* dan 4,58 MPa pada *titanium alloy*. Dengan nilai *safety factor* berada pada rentang 3,71 hingga 4,08. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan material ringan dapat digolongkan pada kondisi aman.

Dari hasil tersebut, didapatkan bahwa perubahan material

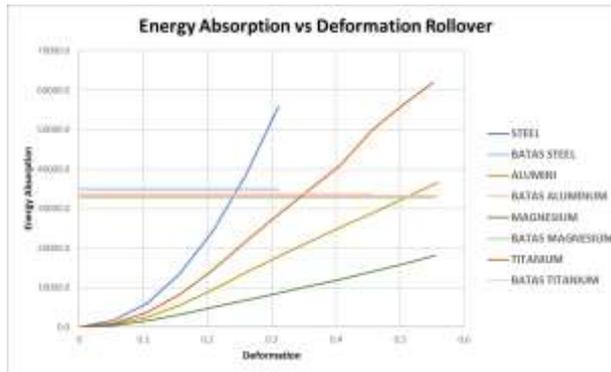
ringan akan distribusi deformasi yang terjadi. Dimana pada material *steel* dan *titanium* didapatkan defleksi maksimum pada *bus body frame* sementara pada material *aluminum* dan *magnesium* memiliki defleksi maksimum pada *side pod battery*. Dengan nilai defleksi meningkat pada variasi material ringan akibat dari perbedaan nilai *young's modulus* material.

Dengan melihat hasil simulasi berupa defleksi dan tegangan maksimum yang tertera pada Gambar 10, maka dapat dilihat mengapa nilai tegangan maksimum meningkat padahal terjadi pada struktur yang sama yaitu pada *chassis* yang tidak dirubah materialnya. Dengan melihat distribusi deformasi yang terjadi pada *chassis* untuk variasi *titanium* dan *magnesium* sebagai contoh, didapatkan distribusi deformasi seperti yang tertera pada Gambar 11 dan Gambar 12.

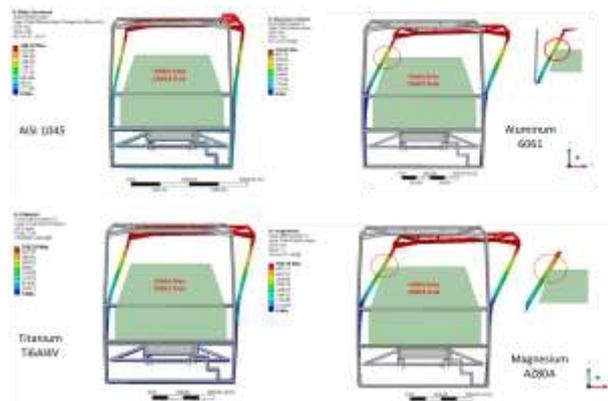
Dari hasil pada Gambar 12, terdapat perbedaan nilai defleksi pada material *titanium* dan *magnesium*. Dimana defleksi pada *magnesium* lebih besar daripada *titanium*.



Gambar 20. Distribusi deformasi pada kondisi berbelok kearah kiri.



Gambar 21. Grafik energi absorpsi vs deformasi uji rollover.



Gambar 22. Defleksi akibat uji rollover dengan variasi material.

Perbedaan nilai defleksi ini yang menyebabkan perbedaan *stress maximum* yang terjadi pada *chassis*. Defleksi pada variasi material berbeda dikarenakan oleh perbedaan *modulus young* pada *side pod battery*. Dimana *titanium* memiliki *modulus young* yang lebih besar daripada *magnesium alloy*.

C. Hasil Simulasi Kekuatan Bus Ketika Mengerem

Dengan melakukan simulasi dengan *finite element methods*, pada kondisi mengerem. Didapatkan hasil simulasi pada Gambar 13.

Perubahan material ringan akan mempengaruhi tegangan maksimum yang terjadi. Terdapat kenaikan tegangan maksimum tertinggi sebesar 4,44 MPa atau 1,96% yaitu pada variasi material magnesium alloy dari material steel dengan nilai awal 226,71 MPa Sementara. tegangan maksimum pada variasi material ringan lain mengalami penurunan yaitu sebesar 19,02 MPa pada aluminum alloy dan 1,57 MPa pada titanium alloy. Dengan nilai *safety factor* berada pada rentang 1,79 hingga 1,99. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan

Tabel 6.
Rekomendasi material alternatif untuk struktur bus body frame

No	Struktur	Material	Pemilihan Material Alasan
1	Battery Side Pod	Aluminum Alloy atau Titanium Alloy	Battery Side Pod berpengaruh pada distribusi deformasi chassis ketika dilakukan uji guling, sehingga diperlukan material dengan <i>stress maximum</i> akan bertambah dengan kenaikan maksimum 10,57%
2	Side Struktur Utama	Titanium Alloy atau Alluminium Alloy (dipertebal)	Side struktur utama memiliki peran penting untuk menyokong ketika dilakukan uji guling, sehingga diperlukan material dengan <i>Young's modulus</i> tinggi atau mempertebal struktur untuk memenuhi standard UNECE R-66
3	Struktur utama atap	Aluminum Alloy	Memiliki peran menopang AC. Didapatkan dari hasil simulasi bahwa semakin ringan struktur atap dapat mengurangi defleksi pada atap. Dipilih aluminum alloy dikarenakan material kuat menahan AC dan memiliki densitas terendah
4	Struktur pembantu atap	Magneisium Alloy	Memiliki peran membantu menopang AC. Dipilih magnesium karena memiliki densitas terendah dan dapat mengurangi defleksi. Magnesium memiliki defleksi tinggi apabila digunakan sebagai struktur utama atap



Gambar 233. Grafik perbandingan tegangan maksimum.

material ringan dapat digolongkan pada kondisi aman.

Dari hasil pada Gambar 14, didapatkan bahwa perubahan material ringan akan distribusi deformasi yang terjadi. Dimana pada material *steel*, *aluminum* dan *titanium* didapatkan defleksi maksimum pada struktur atap. Sementara pada material *magnesium* memiliki defleksi maksimum pada atap bagian tengah, yang mana menunjukkan *magnesium* tidak begitu baik dalam menahan beban AC. Dengan nilai defleksi meningkat pada variasi material ringan akibat dari perbedaan nilai *young's modulus* material.

Perbedaan hasil tegangan maksimum pada hasil simulasi *braking* terjadi dikarenakan hal yang sama seperti pada hasil simulasi beban statis. Yang mana perbedaan tegangan maksimum dikarenakan oleh perbedaan deformasi *chassis* akibat dari perbedaan *young's modulus*. Berikut perbedaan deformasi *chassis* pada kondisi *braking*.

Dari hasil simulasi pada Gambar 15 dan Gambar 16, didapatkan bahwa nilai defleksi pada *aluminum alloy* ketika dilakukan *braking* lebih kecil daripada material *steel*. Hal ini



Gambar 24. Grafik perbandingan defleksi maksimum.

mengakibatkan nilai tegangan maksimum pada *material aluminum alloy* lebih kecil daripada *material steel*. Perbedaan tersebut terjadi dikarenakan pada *side pod battery* bermaterial *aluminum alloy* meskipun memiliki distribusi deformasi yang besar, deformasi yang diakibatkan *battery side pod aluminum alloy* hanya mengakibatkan *chassis* berdefleksi dengan nilai yang lebih kecil daripada *side pod steel*.

D. Hasil Simulasi Kekuatan Bus Ketika Berbelok

Dengan melakukan simulasi dengan *finite element methods*, pada kondisi berbelok ke arah kiri dan kanan. Didapatkan hasil simulasi yang tertera pada Gambar 17 dan Gambar 18.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa perubahan material ringan akan mempengaruhi tegangan maksimum yang terjadi. Terdapat kenaikan tegangan maksimum tertinggi sebesar 33,13 MPa atau 21,46% yaitu pada variasi material *magnesium alloy* pada kondisi berbelok ke arah kanan dari material *steel* dengan nilai awal 154,39 MPa. Tegangan maksimum pada variasi material ringan lain pada kondisi berbelok ke arah kanan juga mengalami kenaikan yaitu 16,32 MPa pada *aluminum alloy* dan 13,19 MPa pada *titanium alloy*. Pada kondisi berbelok ke arah kiri, didapatkan kenaikan tegangan maksimum juga pada ketiga variasi material dengan nilai kenaikan tegangan maksimum tertinggi sebesar 17,04 MPa atau sebesar 10,93% pada variasi material *magnesium alloy*. Untuk variasi material *aluminum alloy* terdapat kenaikan sebesar 2,24 MPa dan material *titanium alloy* sebesar 6,98 MPa. Perbedaan lokasi tegangan maksimum pada saat berbelok ke arah kanan dan kiri, dikarenakan perbedaan percepatan lateral ketika berbelok. Ketika berbelok ke arah kanan, *chassis* sebelah kiri akan terbebani oleh beban yang mengarah relatif ke arah kanan sehingga terjadi tegangan maksimum pada *chassis* sebelah kiri. Hal serupa terjadi pada saat kendaraan berbelok ke arah kiri. Dengan nilai *safety factor* saat kendaraan berbelok ke arah kanan dan kiri berada pada rentang 2,21 hingga 2,68. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan material ringan dapat digolongkan pada kondisi aman.

Dari hasil yang didapat pada Gambar 19 dan Gambar 20, didapatkan bahwa perubahan material ringan akan distribusi deformasi yang terjadi. Dimana pada semua variasi material didapatkan defleksi maksimum pada struktur atap. Terdapat perbedaan letak defleksi maksimum ketika berbelok ke arah kanan dan kiri, dimana perbedaan tersebut akibat dari arah belokan yang mengakibatkan perbedaan percepatan lateral ketika berbelok. Dengan nilai defleksi meningkat pada semua variasi material ringan akibat dari perbedaan nilai *young's*

modulus material.

E. Hasil Simulasi Keamanan Bus

Dengan melakukan simulasi *rollover* untuk mengetahui keamanan bus, didapatkan hasil grafik *deformation vs energy absorption* yang tertera pada Gambar 21.

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa pada untuk material *magnesium* tidak dapat menahan energi pada saat uji *rollover* hingga defleksi sebesar 0,55 m dan tidak memenuhi *standard UNECE R-66*. Sementara material *steel*, *titanium*, dan *aluminum* dapat menahan energi pada saat bus dilakukan uji *rollover* dengan defleksi yang berbeda. Untuk itu perlu dilakukan pengecekan defleksi yang terjadi dengan *safety area UNECE R-66*.

Dari hasil deformasi apabila dilakukan uji *rollover*, didapatkan bahwa material *steel* dan *titanium* memiliki jarak dari *safety area* yang besar. Sementara pada *aluminum* memiliki jarak yang sedikit. Dan pada *magnesium* defleksi telah melebihi *safety area* yang mana menunjukkan tidak lolos dilakukan uji *rollover*. Defleksi tersebut dikarenakan perbedaan *modulus young* dari material yang berbeda. Untuk memperkuat struktur, dapat dilakukan pertebalan pada komponen penyangga utama. Defleksi yang diakibatkan oleh uji *rollover* tertera pada Gambar 22.

F. Rekomendasi Pemilihan Material Hasil Penelitian

Dengan mengolah hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan material alternatif yang direkomendasikan tiap struktur *bus body frame* pada Tabel 6.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut: Penggantian material pada *bus body frame* dapat mengurangi berat hingga 6,32% atau 375,79 Kg pada penggantian material *magnesium alloy*. Pada material *aluminum* didapatkan pengurangan berat sebesar 5,27% dan pada *titanium* sebesar 3,58%. Dengan penambahan efisiensi sebesar maksimum sebesar 5,54% dengan penghematan yang didapatkan tiap 100 km sebesar 6.751,63 rupiah.

Penggantian material pada *bus body frame* dengan material ringan dapat meningkatkan dan mengurangi tegangan maksimum. Tegangan maksimum meningkat dengan peningkatan tertinggi sebesar 33,13% yaitu pada permodelan berbelok ke arah kanan dengan material *magnesium alloy*. Sementara pengurangan tegangan maksimum berada pada pembebanan *braking* dengan variasi material *aluminum alloy*. Kenaikan tegangan maksimum dikarenakan perbedaan defleksi akibat perubahan material *side pod battery* pada bus. Kenaikan dan pengurangan tegangan maksimum dikarenakan perbedaan defleksi akibat perbedaan *young modulus* material *side pod battery* pada bus. Nilai *maximum equivalent stress* terkecil berada pada variasi pembebanan statis dengan material *steel* dengan nilai 101,63 Mpa sementara *maximum equivalent stress* tertinggi berada pada pemodelan *braking* dengan variasi material *magnesium*. Nilai *safety factor* pada keempat model dan keempat variasi berada pada rentangan 1,795 hingga 4,08 yang mana menunjukkan bahwa kekuatan struktur dapat dikatakan aman.

Penggantian material *magnesium alloy AZ80A* pada *bus body frame* tidak dapat menahan dampak saat uji guling. Sementara material *steel*, *aluminum*, dan *titanium* tergolong

dapat menahan dampak saat guling dengan mengacu *standard UNECE R-66*. Untuk aluminium alloy 7075 mengalami peningkatan dari defleksi ketika dilakukan uji guling dari BEV steel bus sebesar 107,6% atau 0,267 m dan 48,2% atau 0,1197 m untuk titanium alloy Ti6Al4V. Grafik perbandingan tegangan maksimum ditunjukkan Gambar 23 dan grafik perbandingan defleksi maksimum ditunjukkan pada Gambar 24.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. F. Ashby and D. Cebon, "Materials selection in mechanical design," *Le J. Phys. IV*, vol. 3, no. C7, 1993.
- [2] M. J. P. Prasetya, "Analisis Kinerja Traksi dan Redesign Rasio Transmisi pada Panser ANOA APC 3 6x6," Departemen Teknik Mesin: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [3] I. N. Sutantra and B. Sampurno, *Teknologi Otomotif*. Surabaya: Guna Widya, 2010.
- [4] D. Micu, D. Iozsa, and C. STAN, "Quasi-Static Simulation Approaches on Rollover Impact of a Bus Structure," in *ACMOS*. 2014.
- [5] L. Kwasniewski, C. Bojanowski, J. Siervogel, J. W. Wekezer, and K. Cichocki, "Crash and safety testing standard for paratransit buses," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 36, no. 2, pp. 235--242, 2009.
- [6] L. Staes and J. Godfrey, *FTA Standards Development Program: Crashworthiness/Crash Energy Management for Transit Bus*. Washington: Federal Transit Administration, 2018.
- [7] Z. Yang, B. Deng, M. Deng, and G. Sun, "A Study on Finite Element Analysis of Electric Bus Frame for Lightweight Design," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, p. 03049.