

ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR *UPPER FRAME* KENDARAAN METRO KAPSUL MENGGUNAKAN METODE ELEMEN

Faiz Febrianto¹ dan I Wayan Suweca²

KK Perancangan Mesin
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha No. 10 Bandung 40132
¹faizfebrianto@yahoo.com, ²cwsuweca@edc.ms.itb.ac.id

Abstrak

Transportasi umum yang kurang memadai menyebabkan sebagian penduduk menggunakan kendaraan pribadi sehingga menimbulkan kemacetan terutama pada kota-kota besar. Kendaraan metro kapsul diharapkan menjadi salah satu solusi permasalahan transportasi terhadap kota-kota besar di Indonesia. Untuk menjamin aspek keselamatan pengguna, kendaraan metro kapsul harus memenuhi regulasi yang ada, antara lain dari aspek kekuatan struktur, terutama pada bagian struktur *upper frame*. Analisis kekuatan struktur diawali dengan studi literatur, pengumpulan informasi mengenai model dan spesifikasi kendaraan metro kapsul, pola operasi, penentuan standar perancangan, perumusan berbagai kasus pembebanan, pemodelan elemen hingga, hingga perolehan tingkat keamanan struktur berdasarkan standar. Standar yang digunakan adalah standar ANSI/ASCE/T&DI 21.2-08. Hasil kasus pembebanan operasi dan kondisi terburuk baik model garis maupun model solid mempunyai nilai yang berdekatan dengan kesalahan rata-rata sebesar 15,7% dan 13,1%. Dari hasil analisis elemen hingga juga diketahui *stress range* terbesar yang terjadi pada kasus beban operasi vertikal, dengan nilai 54,4 MPa pada model elemen garis dan 48,1 MPa pada model elemen solid. Pada kategori beban kondisi terburuk, tegangan tertinggi terjadi pada kondisi pengereman mendadak pada lintasan belok-datar yang memiliki nilai tegangan Von-Mises 296,8 MPa pada model elemen garis dan 259,8 MPa pada model elemen solid. Lokasi kritis ini berada pada *rib* tumpuan suspensi. Kesimpulan akhir dari analisis kekuatan struktur *upper frame* dalam semua kasus pembebanan dapat dinyatakan bahwa struktur *upper frame* memenuhi standar ANSI/ASCE/T&DI 21.2-08.

Kata kunci: Kendaraan Metro Kapsul, Metode Elemen Hingga, Kekuatan Struktur, Tegangan von Mises.

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat pertumbuhan penduduk yang tinggi dan disertai dengan tingkat pemakaian kendaraan yang tinggi pula. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh Ditjen Hubdar Kementerian Perhubungan untuk Provinsi DKI Jakarta Tahun 2014 [1], pemakaian kendaraan bermotor dari tahun 2010 sampai 2013 mengalami peningkatan untuk semua moda kendaraan, dengan rata-rata sebesar 7,4%. Sedangkan pertambahan panjang jalan hanya terjadi antara tahun 2010 sampai 2011 dengan angka peningkatan sekitar 5,3%. Tingginya tingkat pemakaian kendaraan

bermotor dengan tidak diimbangi penambahan atau pelebaran jalan akan menyebabkan kemacetan pada kota-kota besar. Kemacetan tersebut dapat diatasi dengan menerapkan moda transportasi massal seperti *monorail*, *subway*, trem dan sebagainya. Namun, karena di Indonesia sudah banyak perumahan padat, maka pembangunan *subway* dan trem sudah tidak memungkinkan lagi. Oleh karena itu, salah satu moda yang cocok adalah dengan menggunakan kendaraan metro kapsul dengan jalur melayang (*elevated*).

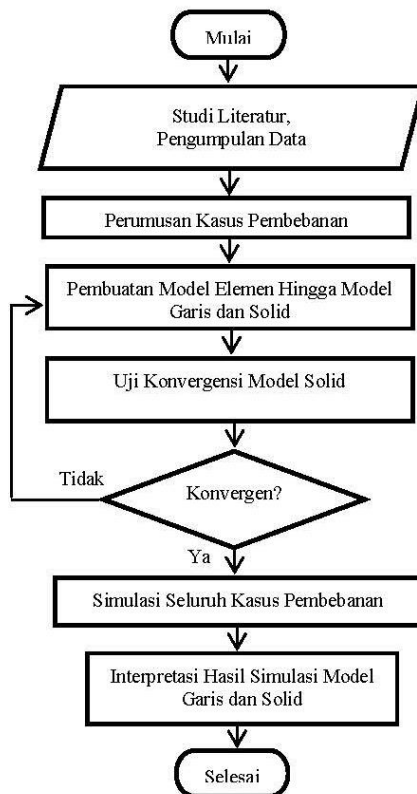
Untuk menjamin kendaraan metro kapsul tersebut aman, maka diperlukan analisis kekuatan strukturnya. Pada penelitian ini

analisis dilakukan pada struktur *upper frame* MK2808. Struktur ini merupakan bagian penting, karena menahan *body* kendaraan, berat penumpang, beban angin dan beban percepatan. Dalam analisisnya, struktur ini akan dimodelkan dengan menggunakan dua jenis elemen yang berbeda untuk meningkatkan kepercayaan hasil yang diperoleh. Kedua jenis elemen yang digunakan adalah model dengan elemen garis dan model dengan elemen solid (volume). Hasil dari kedua model tersebut lalu dibandingkan untuk mengetahui konsistensi hasil yang diperoleh.

Tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan simulasi metode elemen hingga model elemen garis dan elemen solid dan memeriksa tingkat keamanan struktur *upper frame* berdasarkan standar ANSI/ASCE/T&DI 21.2-08 [2].

Metodologi

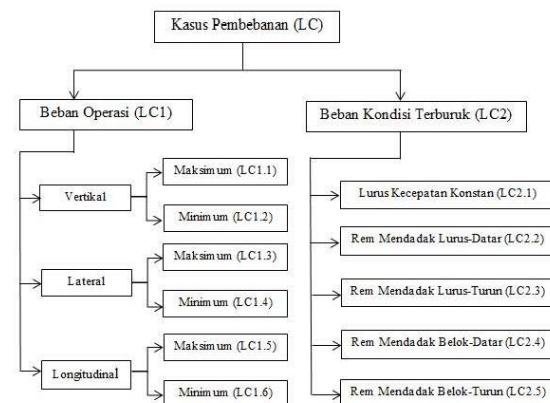
Dalam proses analisis kekuatan struktur mengikuti diagram alir sebagai berikut:



Gb. 1. Diagram alir analisis struktur

Kasus Pembebanan

Perumusan kasus pembebanan dilakukan mengikuti standar ANSI/ASCE/T&DI 21.2-08 di mana kasus pembebanan dibedakan menjadi dua bagian utama yaitu kasus kondisi beban operasi yang merupakan beban bolak-balik pada kendaraan ketika beroperasi secara normal. Kemudian ada kasus pembebanan kondisi terburuk, terjadi ketika kendaraan dalam keadaan *emergency* yaitu ketika dilakukan pengereman secara mendadak dan juga efek angin. Berikut skema kasus pembebanan kendaraan metro kapsul.



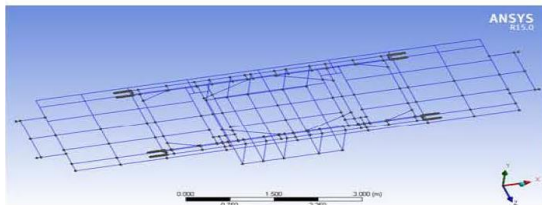
Gb. 2. Kasus pembebanan pada kendaraan

Pemodelan Elemen Hingga

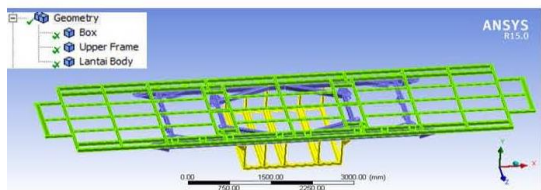
Analisis kekuatan struktur yang mempunyai bentuk kompleks sulit diselesaikan dengan metode analitik, maka digunakan metode elemen hingga. Pemodelan ini dibantu dengan perangkat lunak ANSYS Workbench 15.0. Pemilihan jenis analisisnya adalah *static structural*. Analisis *static structural* merupakan analisis untuk menentukan defleksi, tegangan, regangan dan gaya pada struktur maupun komponen akibat pemberian beban. Analisis statik tidak meliputi efek inersia dan efek *damping*. Kondisi beban dan respon diasumsikan tunak (*steady*), di mana beban dan respon struktur diasumsikan bervariasi secara perlahan dari waktu ke waktu. Dalam penelitian ini dilakukan dua pemodelan yaitu menggunakan dengan elemen garis dan dengan elemen solid.

Dalam pemodelan elemen hingga, langkah pertama adalah membuat dan menentukan geometri yang akan dimodelkan. Geometri dibuat menjadi dua macam yaitu

geometri garis seperti pada Gambar 3 dan geometri solid seperti pada Gambar 4. Geometri yang dimodelkan terdiri dari tiga komponen yaitu komponen *box* (kuning), rantai *body* (hijau), dan *upper frame* (biru). Komponen rantai *body* dan *box* berfungsi sebagai transfer gaya ke komponen *upper frame*. Sedangkan komponen yang di analisis nantinya hanya memfokuskan pada *upper frame*.



Gb. 3. Geometri garis



Gb. 4. Geometri solid

Setelah pendefinisian geometri langkah selanjutnya adalah mendefinisikan material tiap-tiap komponen. Material pada komponen rantai *body* dan *box* menggunakan material ST 37-2 (*structural steel*), sedangkan komponen *upper frame* menggunakan material Weldox 700.

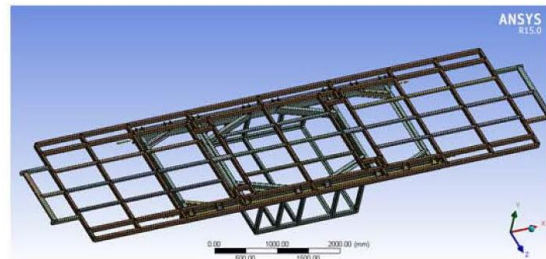
Properties of Outline Row 3: Structural Steel			
	A	B	C
	Property	Value	Unit
1			
2	Density	7850	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Po...	
8	Young's Modulus	2E+11	Pa
9	Poisson's Ratio	0.3	
10	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
11	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular	
16	Strain-Life Parameters		
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa

Properties of Outline Row 5: weldox 700			
	A	B	C
	Property	Value	Unit
1			
2	Density	7850	kg m ⁻³
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Po...	
5	Young's Modulus	2E+11	Pa
6	Poisson's Ratio	0.3	
7	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
8	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
9	Tensile Yield Strength	7E+08	Pa
10	Tensile Ultimate Strength	7.8E+08	Pa

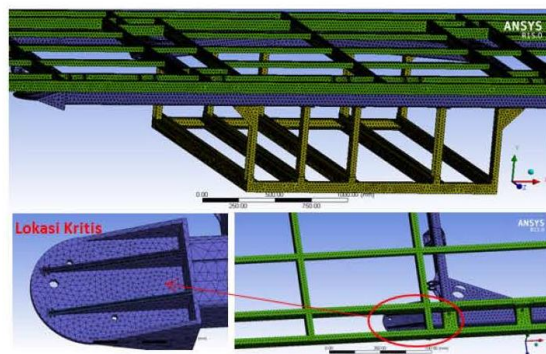
Gb. 5. Tampilan pendefinisian material

Proses selanjutnya adalah proses meshing. Jumlah elemen yang digunakan pada model garis ini adalah 3863 elemen

dengan menggunakan elemen beam 188 seperti pada Gambar 6. Sedangkan model solid menggunakan elemen *tetrahedron* (*tet10*). Bagian penumpu suspensi dianggap sebagai bagian yang kritis sehingga pada bagian ini meshing diperkecil ukuranya, seperti bisa dilihat pada Gambar 7.

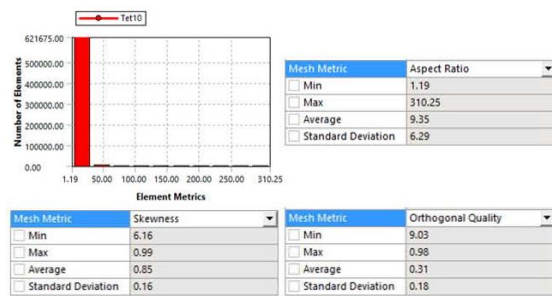


Gb. 6. Meshing model garis



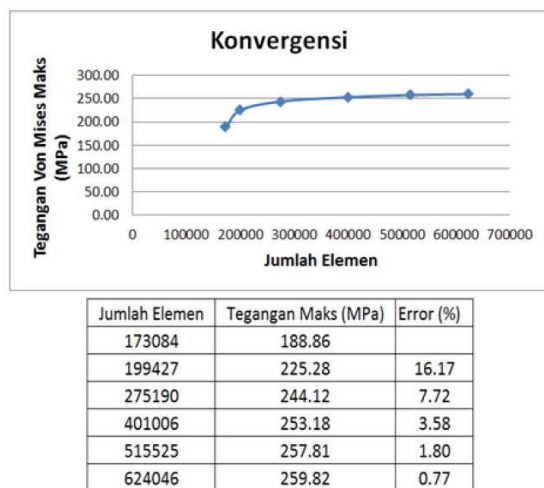
Gb. 7. Meshing model solid

Setelah proses *meshing*, selanjutnya dilakukan pengecekan kualitas elemen. Salah satu kriterianya yang penting adalah *aspect ratio*. Batas nilai *aspect ratio* yang masih bisa diterima adalah di bawah 50 [3]. Penentuan kualitas elemen penunjang lainnya adalah dari nilai *skewness* dan *orthogonal quality*. *Skewness* mempunyai batas nilai bisa diterima 0,0 – 0,94 dan nilai *orthogonal quality* mempunyai batas yang bisa diterima dalam rentang 0,15 – 1,0 [4]. Kemudian dari hasil *meshing* nilai *aspect ratio* rata-rata adalah 9,35 dengan *skewness* rata-rata adalah 0,85 dan nilai *orthogonal quality* rata-rata adalah 0,31 seperti bisa dilihat pada Gambar 8.



Gb. 8. Pengecekan kualitas elemen

Selanjutnya untuk menentukan berapa akurat model yang digunakan dilakukan uji konvergensi. Uji konvergensi ini dilakukan dengan cara memvariasikan jumlah elemen hingga mendapatkan hasil tegangan yang cenderung konstan nilainya. Dalam uji konvergensi ini model yang digunakan adalah model dengan kasus beban rem mendadak belok-datar. Prosentase kesalahan (*error*) konvergensi dikatakan sangat baik jika hasilnya kurang dari 1% [5]. Sehingga berdasarkan Gambar 8, dipilihlah model dengan jumlah elemen 624046 dengan kesalahan paling kecil yaitu 0,77%. Dari gambar juga bisa dilihat hasil kurva cenderung mengarah ke satu nilai tegangan.



Gambar 9. Hasil uji konvergensi

Hasil Analisis

Hasil analisis kekuatan struktur *upper frame* pada pembebanan operasi dinyatakan memenuhi standar jika tegangan yang dihasilkan oleh masing-masing pembebanan tidak melebihi 0,75 terhadap *allowable*

fatigue stress range ($\sigma_r < 0,75S_e$). Berdasarkan data material, maka diperoleh nilai $0,75S_e = 0,75 (0,5S_u) = 0,75(0,5 \times 780 \text{ MPa}) = 292,5 \text{ MPa}$. Sehingga hasil pembebanan operasi dinyatakan memenuhi standar jika $\sigma_r < 292,5 \text{ MPa}$.

Sedangkan pada kasus kondisi terburuk, dianggap memenuhi standar jika tegangan yang dihasilkan oleh seluruh kemungkinan kombinasi beban terburuk, termasuk faktor beban (*load factor*) sebesar 1,5; tidak melebihi kekuatan luluh material struktur utama $\sigma < S_y$. Berdasarkan data material, nilai $S_y = 700 \text{ MPa}$. Sehingga hasil pembebanan kondisi terburuk dinyatakan memenuhi standar standar jika $\sigma < 700 \text{ MPa}$.

Hasil simulasi baik untuk kasus pembebanan kondisi operasi dan kondisi terburuk diperlihatkan pada Tabel 1. Hasil dari simulasi menyatakan nilainya memenuhi standar pada seluruh kasus pembebanan.

Tabel 1. Rangkuman hasil simulasi

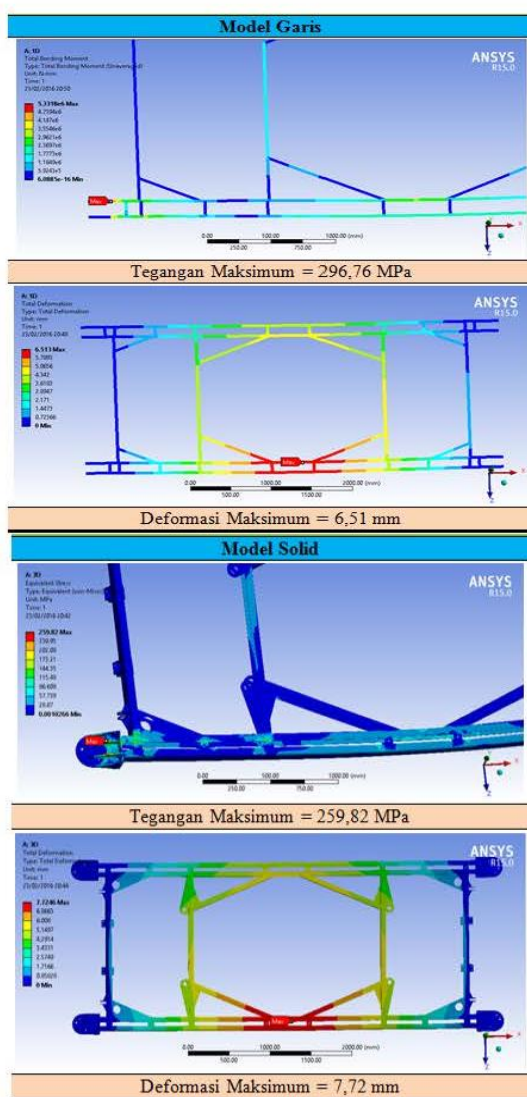
Beban Vertikal (LC1.1 dan LC1.2)					
Model	Tegangan [Maks] (MPa)	Tegangan [Min] (MPa)	Stress Range (MPa)	0,75 S _y ^f (MPa)	Status
Solid	144,32	96,21	48,11	292,5	Memenuhi Standar
Garis (datum)	170,81	116,45	54,36		
Error (%)	15,51	17,38			
Beban Lateral (LC1.3 dan LC1.4)					
Model	Tegangan [Maks] (MPa)	Tegangan [Min] (MPa)	Stress Range (MPa)	0,75 S _y ^f (MPa)	Status
Solid	135,79	99,79	36	292,5	Memenuhi Standar
Garis (datum)	152,69	121,15	31,54		
Error (%)	11,07	17,63			
Beban Longitudinal (LC1.5 dan LC1.6)					
Model	Tegangan [Maks] (MPa)	Tegangan [Min] (MPa)	Stress Range (MPa)	0,75 S _y ^f (MPa)	Status
Solid	123,93	116,56	7,37	292,5	Memenuhi Standar
Garis (datum)	143,69	140,24	3,44		
Error (%)	13,75	16,89			

Kasus Pembebanan		Tegangan Maks (MPa)	S _y (MPa)	SF	Status
Lurus Kecepatan Konstan (LC2.1)					
Model Solid		242,31	700	2,89	Memenuhi Standar
Model Garis (datum)		278,39		2,51	
Error (%)		12,96			
Rem Mendadak Lurus-Datar (LC2.2)					
Model Solid		235,05	700	2,98	Memenuhi Standar
Model Garis (datum)		276,09		2,54	
Error (%)		14,86			
Rem Mendadak Lurus-Turun (LC2.3)					
Model Solid		230,92	700	3,03	Memenuhi Standar
Model Garis (datum)		266,05		2,63	
Error (%)		13,20			
Rem Mendadak Belok-Datar (LC2.4)					
Model Solid		259,82	700	2,69	Memenuhi Standar
Model Garis (datum)		296,76		2,36	
Error (%)		12,45			
Rem Mendadak Belok-Rurun (LC2.5)					
Model Solid		254,14	700	2,75	Memenuhi Standar
Model Garis (datum)		289,19		2,42	
Error (%)		12,12			

Pada tabel terlihat bahwa kasus beban operasi vertikal menjadi kasus paling kritis dengan nilai *stress range* 54,36 MPa pada model garis dan 48,11 MPa pada model solid.

Sedangkan pada kasus beban kondisi terburuk tegangan Von Mises terbesar terjadi pada kasus pengereman mendadak pada lintasan belok-datar dengan nilai tegangan sebesar 296,76 MPa dengan *safety factor* (SF) 2,36 pada model garis dan sebesar 259,82 MPa dengan *safety factor* (SF) 2,75 pada model solid.

Lokasi tegangan maupun deformasi maksimum baik model garis maupun model solid pada kasus pengereman mendadak pada lintasan belok-datar dapat dilihat pada Gambar 10.



Gb. 10. Lokasi tegangan dan deformasi maksimum

Kontur tegangan maupun deformasi yang terjadi pada model garis maupun model solid memiliki bentuk yang mirip dan besar

tegangan yang tidak jauh berbeda. Sehingga hasil yang diperoleh dari kedua model dapat dikatakan konsisten.

Kesimpulan

Berdasarkan analisis kekuatan struktur *upper frame* dengan bantuan perangkat lunak elemen hingga didapatkan hasil sebagai berikut:

- Hasil untuk kasus pembebanan operasi antara model garis dan solid memiliki nilai tegangan yang berdekatan pada semua kasus, dengan kesalahan rata-rata sebesar 15,7%.
- Untuk kasus pembebanan kondisi terburuk antara model garis dan model solid, keduanya memiliki nilai tegangan yang berdekatan pada semua kasus dengan kesalahan rata-rata sebesar 13,1%.
- Berdasarkan hasil keseluruhan kasus pembebanan, juga dapat dilihat nilai tegangan pada model garis selalu lebih besar dari nilai model solid.
- Besar nilai tegangan untuk semua kasus pembebanan operasi dan pembebanan kondisi terburuk memenuhi standar.

Referensi

- [1] Direktorat Jenderal Perhubungan Darat, *Profil dan Kinerja Perhubungan Darat 2014 Propinsi DKI Jakarta*, Kementerian Perhubungan, Ditjen Hubdat, Jakarta.
- [2] American Society of Civil Engineers, *Automated People Mover Standards-Part 2 (ANSI/ASCE/T&DI 21.2-08)*, American Society of Civil Engineers, Virginia, 2008
- [3] Daryl L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, Edisi 4, Thomson Canada Limited, Ontario, 2007.
- [4] Metin Ozen, Ph.D, *Meshing Workshop*, Ozen Engineering, Inc, 2014.
- [5] G.B. Sinclair, J.R. Beisheim dan S. Sezer, *Practical Convergence-Divergence Checks for Stresses from FEA*, International ANSYS Conference, 2008.