

Optimasi Desain Struktur *Train Nose Frame* dengan *Finite Element Analysis*

S Insano^{*1}, H S B Rochardjo²

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Gadjah Mada

E-mail: suryainsano@mail.ugm.ac.id^{*1}, heru-sbr@ugm.ac.id²

Abstrak. Pada penelitian ini dilakukan simulasi *Ansys Static Structural 2020 R2* untuk menganalisis deformasi, nilai tegangan, dan optimasi dengan penentuan *safety factor*. Perancangan *train nose* dilakukan dengan menggunakan *Computer-aided engineering (CAE)*, Autodesk Inventor 2023. Paduan aluminium *alloy 6005 T5* digunakan sebagai material struktur *train nose*. Model ini dirancang berdasarkan *truss structure* sederhana. *Structure truss* memiliki ketebalan yang bervariasi, mulai dari 50 mm x 50 mm, 60 mm x 60 mm, 70 mm x 70 mm, 80 mm x 80 mm, 90 mm x 90 mm, 100 mm x 100 mm, dan 110 mm x 110 mm. Metode uji pembebanan struktur statis menggunakan beberapa variasi, seperti pembebanan vertikal, kompresi, dan puntir. *Vertikal loading test* terdiri dari dua masinis, panel, dan pemberat maskara. Rumus perhitungan pembebanan vertikal didasarkan pada peraturan hukum JIS E 7105. Menurut JIS E 7105, beban tekan longitudinal harus dipertahankan oleh kereta api sebesar 400 kN dengan atau tanpa beban vertikal. Perhitungan pembebanan dengan uji kompresi yang dipilih adalah tanpa penumpang, atau hanya kompresi dan pembebanan vertikal. Analisis lainnya meliputi kompresi penumpang dan *total vertical loading*. Sedangkan metode beban puntir dilakukan dengan simulasi dengan mengangkat salah satu bantalan pendongkrak secara vertikal dengan beban seberat 4 ton. Nilai optimum didasarkan pada uji statis lainnya, seperti uji tegangan dengan nilai maksimum 108,18. Optimasi ulang dilakukan pada struktur penampang yang memiliki ukuran 110 mm x 110 mm. Simulasi menunjukkan bahwa pengurangan jumlah balok dilakukan pada sisi, atas, dan lantai struktur, namun dengan *safety factor* yang sama. Sedangkan struktur depan kereta diubah sedemikian rupa untuk mengurangi efek deformasi akibat beban kompresi yang diuji. Pada simulasi akhir didapatkan *safety factor* sebesar 2,3961 pada luasan 110 mm x 110 mm. Ini menunjukkan semakin besar struktur, semakin besar *safety factor* yang kita dapatkan. Dari simulasi terlihat bahwa *safety factor* semakin meningkat, dengan semakin besarnya luas area. *Safety factor* dapat ditentukan oleh *ultimate stress* dari material. Semakin kecil tegangan maksimum dari balok, semakin besar *safety factor* yang kita dapatkan.

Kata kunci: *train nose*; optimasi; uji struktur statis; *safety factor*

Abstract. In this study, *Ansys Static Structural 2020 R2* simulations were conducted to analyze deformation, stress value, and optimization with the *safety factor* determination. Design of the *train nose* was conducted using *Computer-aided engineering (CAE)* Autodesk Inventor 2023. Aluminum alloy-wrought 6005 T5 is used as a material for the structure of the *train nose*. The model is designed based on a simple *truss structure*. The *truss structure* has various thicknesses, starting from 50 mm x 50 mm, 60 mm x 60 mm, 70 mm x 70 mm, 80 mm x 80 mm, 90 mm x 90 mm, 100 mm x 100 mm,

and 110 mm x 110 mm. The loading test method of static structure uses some variations, such as vertical, compression, and twisting load. The vertical loading test consists of two machinists, panels, and mascara weights. The formula calculation of vertical loading is based on the law regulation JIS E 7105 [8]. According to JIS E 7105, longitudinal compression loading must be kept by train at the value of 400 kN with or without vertical loading. The calculation of loading with the chosen compression test is with no passengers, or just compression and vertical loading. The other analysis includes passenger compression and total vertical loading. On the other hand, the method of twisting load is done by simulation by lifting one of the jacking pads vertically at the weight of 4 tons [8]. The optimum value is based on the other static test, such as the stress test with a maximum value of 108.18. Re-optimization is conducted on the structural cross-section which has a size of 110 mm x 110 mm. The simulation shows that the reduction in the number of beams is carried out on the sides, top, and floor of the structure, but with the same safety factor. Meanwhile, the front structure of the train is changed in such a way as to reduce the effect of deformation by the tested compression load. In the final simulation, we get the safety factor of 2.3961 in the size of area 110 mm x 110 mm. It shows the bigger structure, the bigger the safety factor we get. From the simulation, we can see that the safety factor getting increases, with the bigger size area. The safety factor can be defined by the ultimate stress from the material. The smaller the maximum stress from the beam, the bigger the safety factor we get.

Keywords: train nose; optimization; static structure test; afety factor.

1. Pendahuluan

Proses perancangan struktur *train nose* merupakan langkah penting dalam rekayasa kendaraan kereta api. *Train nose* adalah bagian depan kereta api yang bertugas melindungi masinis dan penumpang kereta api jika terjadi tabrakan. Oleh karena itu, sangat penting untuk merancang hidung kereta api yang kuat, ringan, dan mampu menyerap energi benturan untuk meminimalkan cedera dan korban jiwa jika terjadi kecelakaan. Untuk mencapai hal ini, para insinyur harus mempelajari dan mengoptimalkan desain struktur *train nose* dengan hati-hati dan mempertimbangkan beberapa faktor seperti kekuatan, berat, ketahanan benturan, dan perilaku struktural. Performa optimum *train nose* yang diperoleh diverifikasi dengan eksperimen model skala 1/127 menggunakan rig model bergerak [1]. Dengan mempertimbangkan aspek desain ini secara hati-hati, para insinyur dapat memastikan bahwa *train nose* memberikan tingkat perlindungan semaksimal mungkin. Menggunakan teori akustik, sebuah penelitian menunjukkan bahwa multistep *train noses* lebih efektif dalam mengurangi gelombang *micro-pressure* [2]. Ketika gelombang kompresi yang dihasilkan oleh kereta yang memasuki terowongan tiba di pintu keluar terowongan, gelombang yang disebut gelombang tekanan mikro dipancarkan ke luar [3].

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengoptimalkan *train nose frame* adalah dengan menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) dengan tipe elemen tetrahedral menggunakan Ansys 2020 R2-Static Structural. Analisis elemen hingga membutuhkan alat berupa *Computer-aided engineering* (CAE) Autodesk Inventor 2023 untuk mengevaluasi perilaku berbagai material dan konfigurasi pada berbagai beban dan kondisi. Hal ini dapat membantu teknisi menentukan desain optimal untuk rangka *train nose* yang memberikan perlindungan maksimal sekaligus ringan dan hemat biaya produksi. Aspek penting lainnya dalam mengoptimalkan *train nose frame* adalah memperhitungkan kemungkinan kesalahan manufaktur dan produksi. Meskipun menggunakan teknik analitik canggih, tidak mungkin untuk sepenuhnya menghilangkan kemungkinan kesalahan selama proses pembuatan. Untuk mengatasi masalah ini, teknisi harus merancang *train nose frame* yang kokoh dan tangguh, dengan redundansi bawaan dan pengamanan anti gagal untuk memastikan kinerjanya bahkan jika ada kesalahan produksi kecil.

Vibration fatigue dianggap sebagai fenomena kerusakan penting yang perlu dipertimbangkan dalam desain dan analisis struktur optimasi terhadap eksitasi eksternal dan/atau internal selama operasi [4]. Sebuah studi numerik telah menunjukkan bahwa keandalan kinerja kelelahan tidak dapat dijamin hanya dengan mempertimbangkan kondisi pembebanan *quasi-static* [5]. Secara keseluruhan, optimalisasi *train nose frame* merupakan komponen penting dalam desain dan rekayasa kereta api. Dengan menggunakan

teknik analitik canggih dan simulasi komputasi, para insinyur dapat merancang dan mengoptimalkan *train nose frame* yang memberikan perlindungan maksimal bagi penumpang sekaligus ringan, hemat biaya, dan tahan terhadap kesalahan produksi. Hal ini dapat meningkatkan keselamatan perjalanan kereta api dan mengurangi risiko cedera dan kematian jika terjadi kecelakaan. Semua parameter ditentukan berdasarkan kombinasi aturan yang tercantum dalam standar JIS E 7105 tentang Metode Uji Statis Badan Kereta Api. Metode desain bentuk parametrik bisa dengan tepat menggambarkan bentuk *train nose* tiga dimensi dari kereta berkecepatan tinggi dan bisa jadi diterapkan pada konsep desain dan optimalisasi bentuk *train nose* [6].



Gambar 1. Macam-macam *train nose* berkecepatan tinggi [6].

2. Metode

Pada penelitian ini terdapat beberapa tahapan proses yang meliputi persiapan peralatan dan bahan penelitian. Desain geometri dari *train nose* yang disimulasikan merujuk pada desain *train nose* yang terdiri dari beberapa tahapan. dimulai dengan mengidentifikasi tujuan dan kriteria desain yang ingin dicapai. Hal ini meliputi parameter seperti kekuatan struktural, keamanan dan faktor-faktor lain yang relevan. tujuan ini akan menjadi dasar untuk mengembangkan strategi optimasi. Selanjutnya membuat model 3D *train nose frame* menggunakan perangkat lunak CAD (*Computer-Aided Design*). Analisis awal dilakukan untuk mendapatkan pemahaman awal tentang performa *train nose* yang ada. Ini melibatkan simulasi menggunakan perangkat lunak CAE, seperti analisis kekuatan struktural untuk mengidentifikasi area-area yang membutuhkan perbaikan atau perubahan.

Paduan aluminium - tempa 6005 T5 digunakan sebagai bahan untuk struktur hidung kereta. Bahan tersebut memiliki beberapa sifat yang lebih baik daripada jenis Aluminium lainnya, seperti ekstrusi yang sesuai dan perawatan permukaan yang mudah. Karakteristik paduan Aluminium 6005 T5 adalah serbaguna, dapat dirawat dengan panas, sangat mudah dibentuk, dapat dilas, dan kekuatan cukup tinggi ditambah dengan ketahanan korosi yang sangat baik. Sifat-sifat paduan Aluminium 6005 T5, baik Mekanik maupun Fisik ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Paduan aluminium 6005 T5 [7].

<i>Physical Properties</i>	<i>Density</i>	2,7 g/cc
	<i>Ultimate Tensile Strength</i>	260 MPa
	<i>Yield Tensile Strength</i>	240 MPa
	<i>Modulus of Elasticity</i>	69 GPa
<i>Mechanical Properties</i>	<i>Fatigue Strength</i>	100 MPa
	<i>Shear Modulus</i>	26 GPa
	<i>Shear Strength</i>	205 MPa

Tahap berikutnya adalah mengidentifikasi dan kriteria desain yang ingin dicapai, Hal ini meliputi parameter seperti kekuatan struktural, keamanan dan faktor-faktor lain yang relevan. Tujuan ini akan

menjadi dasar untuk mengembangkan strategi optimasi. Kemudian membuat model 3D struktur *train nose* menggunakan perangkat CAD. Analisis awal dilakukan untuk mendapatkan pemahaman awal tentang performa *train nose* yang ada. Ini melibatkan simulasi menggunakan perangkat lunak CAE, seperti analisis kekuatan struktural untuk mengidentifikasi area-area yang membutuhkan perbaikan atau perubahan. Selanjutnya mengatur nilai *cross-section* seperti seperti lebar, tinggi dan Ketebalan, sesuai dengan persyaratan desain. Memastikan bahwa proporsi *cross-section* memenuhi persyaratan kekuatan dan kekakuan dan karakteristik yang diinginkan, serta mempertimbangkan gaya yang diterapkan pada *frame*. Setelah itu dilakukan *meshing process* menggunakan FEM, *load test*, *post processing* optimasi topologi.

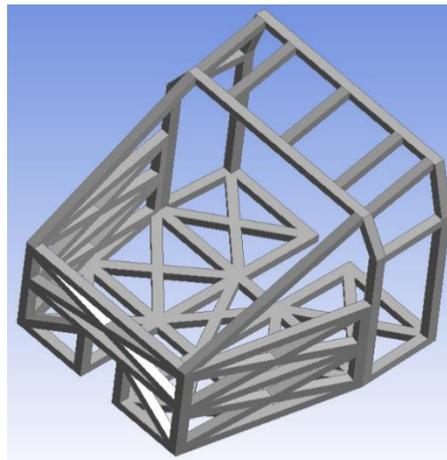
3. Hasil dan Pembahasan

Pada awalnya, struktur rangka batang hidung kereta dipilih dari rangka padat, dengan faktor keamanan minimum adalah 2. Model dirancang berdasarkan struktur rangka sederhana. Struktur truss memiliki ketebalan yang bervariasi, mulai dari 50 mm x 50 mm, 60 mm x 60 mm, 70 mm x 70 mm, 80 mm x 80 mm, 90 mm x 90 mm, 100 mm x 100 mm, dan 110 mm x 110 mm. Model struktur rangka batang penyangga sederhana pada hidung kereta sebelum dioptimasi dengan ukuran 110 mm x 110 mm ditampilkan pada Gambar 1.

Metode uji pembebanan menggunakan beberapa variasi, seperti pembebanan vertikal, kompresi, dan puntir. Pembebanan vertikal terdiri dari dua masinis, panel, dan pemberat maskara. Rumus perhitungan pembebanan vertikal didasarkan pada peraturan hukum JIS E 7105 pada persamaan 1 [8]. Menurut JIS E 7105, beban tekan longitudinal harus dipertahankan oleh kereta api sebesar 400 kN dengan atau tanpa beban vertikal. Perhitungan pembebanan dengan uji kompresi yang dipilih adalah tanpa penumpang, atau hanya kompresi dan pembebanan vertikal. Analisis lainnya meliputi kompresi penumpang dan beban vertikal total. Sedangkan metode beban puntir dilakukan dengan simulasi dengan mengangkat salah satu bantalan pendongkrak secara vertikal dengan beban seberat 4 ton [8]. Diketahui: P_v = Beban vertikal (kg), P_1 = Beban kereta api (kg), P_2 = Beban penumpang (kg), dan konstanta dinamis $K = 1,3$.

$$P_v = K(P_1 + P_2)$$

1



Gambar 2. Model struktur *truss train nose* sebelum optimasi dengan ukuran 110 mm x 110 mm.

Christiensen dan Klarbring, mengatakan bahwa optimalisasi struktural adalah pokok bahasan untuk membuat suatu kumpulan material menahan beban dengan cara terbaik [9]. Untuk meningkatkan efisiensi desain bentuk hidung dan mengurangi biaya desain, banyak penelitian telah dilakukan oleh para peneliti [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], dan [18]. Optimalisasi struktural dapat dikaitkan dengan desain struktural. Solusi terbaik untuk struktur adalah menggunakan beberapa material ringan namun dengan kekakuan terbaik pada struktur pertama. Dalam tulisan ini, untuk meningkatkan kekerasan struktur, dan

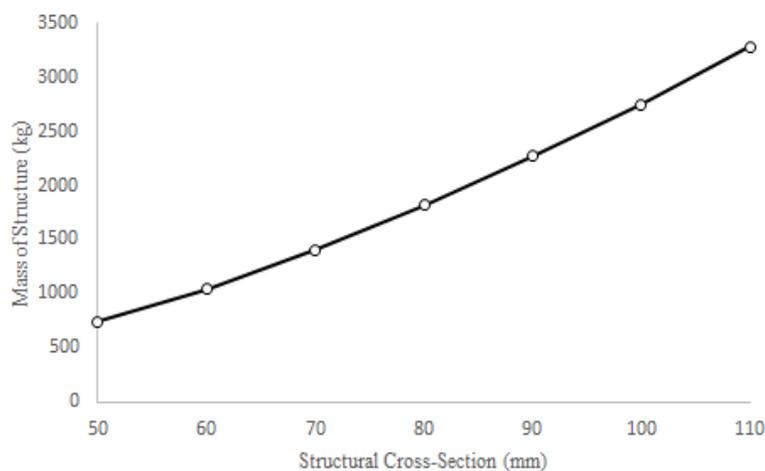
untuk mengurangi berat. Secara umum, optimasi struktural dapat dibagi menjadi beberapa kelas, seperti optimasi topologi, optimasi bentuk, dan optimasi ukuran.

Telah dilakukan simulasi numerik topologi struktur *train nose* yang diawali dengan melakukan variasi Ketebalan batang dari ukuran 50 mm x 50 mm menjadi 110 mm x 110 mm. Simulasi tersebut memiliki berbagai hasil seperti distribusi tegangan ekuivalen, deformasi, dan *safety factor*. Tabel 2 menampilkan hasil inisiasi *structural topology train nose*.

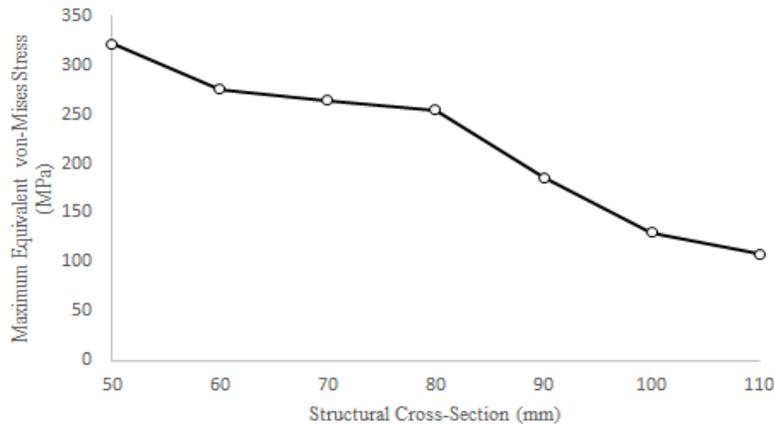
Table 2. Nilai Hasil Simulasi *Train Nose*

Size Area (mm x mm)	Weights (kg)	Max. Deformation (mm)	Max. Stress (MPa)	Min. Safety Factor
50 x 50	740.13	191.81	321,37	0.80654
60 x 60	1045	53.18	275.37	0.9413
70 x 70	1404.1	28.09	264.28	0.98079
80 x 80	1817.5	16.36	254.87	1.017
90 x 90	2267.5	10.19	186.02	1.3934
100 x 100	2750.9	6.68	129.73	1.998
110 x 110	3278.5	4.55	108.18	2.3961

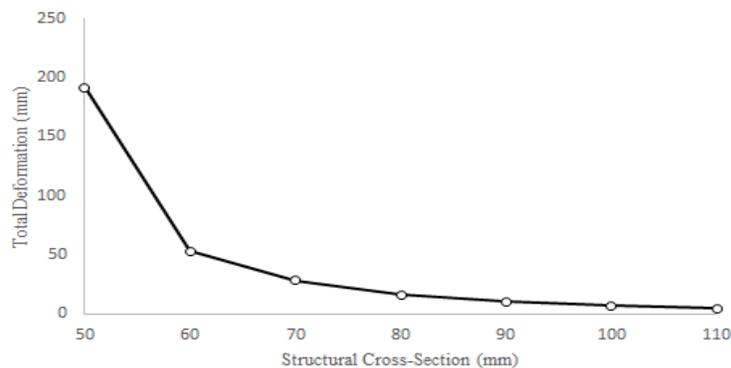
Dapat dilihat dari Tabel 2 bahwa deformasi dan tegangan maksimum yang diberikan pada *train nose* semakin menurun seiring dengan bertambahnya luas dan luasan batang. Sedangkan bobot total struktur bisa bertambah secara signifikan. Penurunan tegangan maksimum dari profil dapat berdampak pada luasan yang memperbesar momen inersia. Profil *stress beam* memiliki hubungan dengan momen inersia. Dengan kata lain, peningkatan momen inersia dapat mempengaruhi tegangan minimum yang diterima. Gambar 3 menunjukkan grafik massa struktur yang mengalami peningkatan yang sejalan dengan *structural cross section*, sedangkan untuk grafik total *deformation* ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 3. *Structural Cross-Section (mm) vs Mass of Structure (kg)*



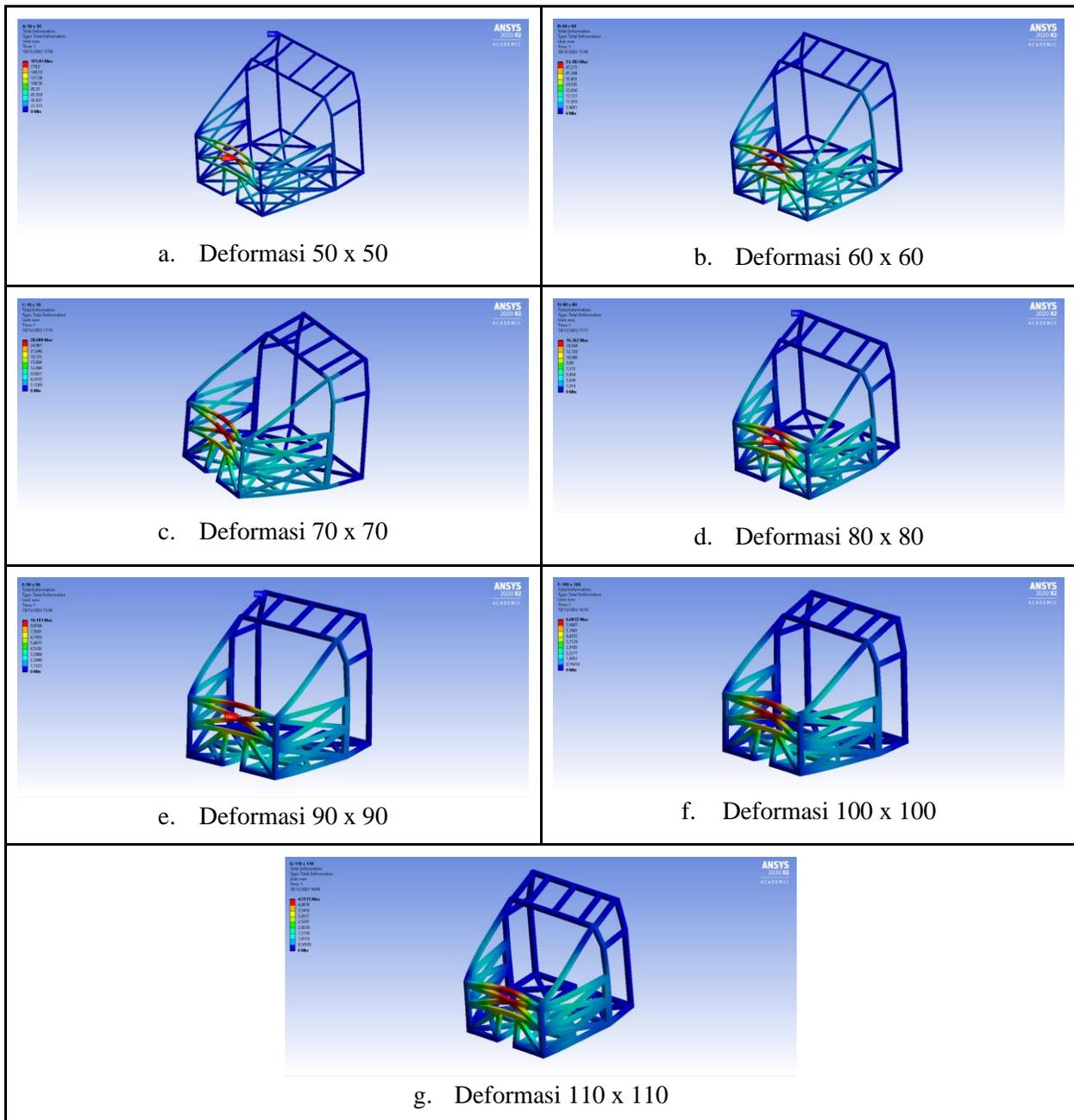
Gambar 4. Maximum Equivalent von Mises Stress vs Structural Cross-Section



Gambar 5. Total Deformation vs Structural Cross-Section

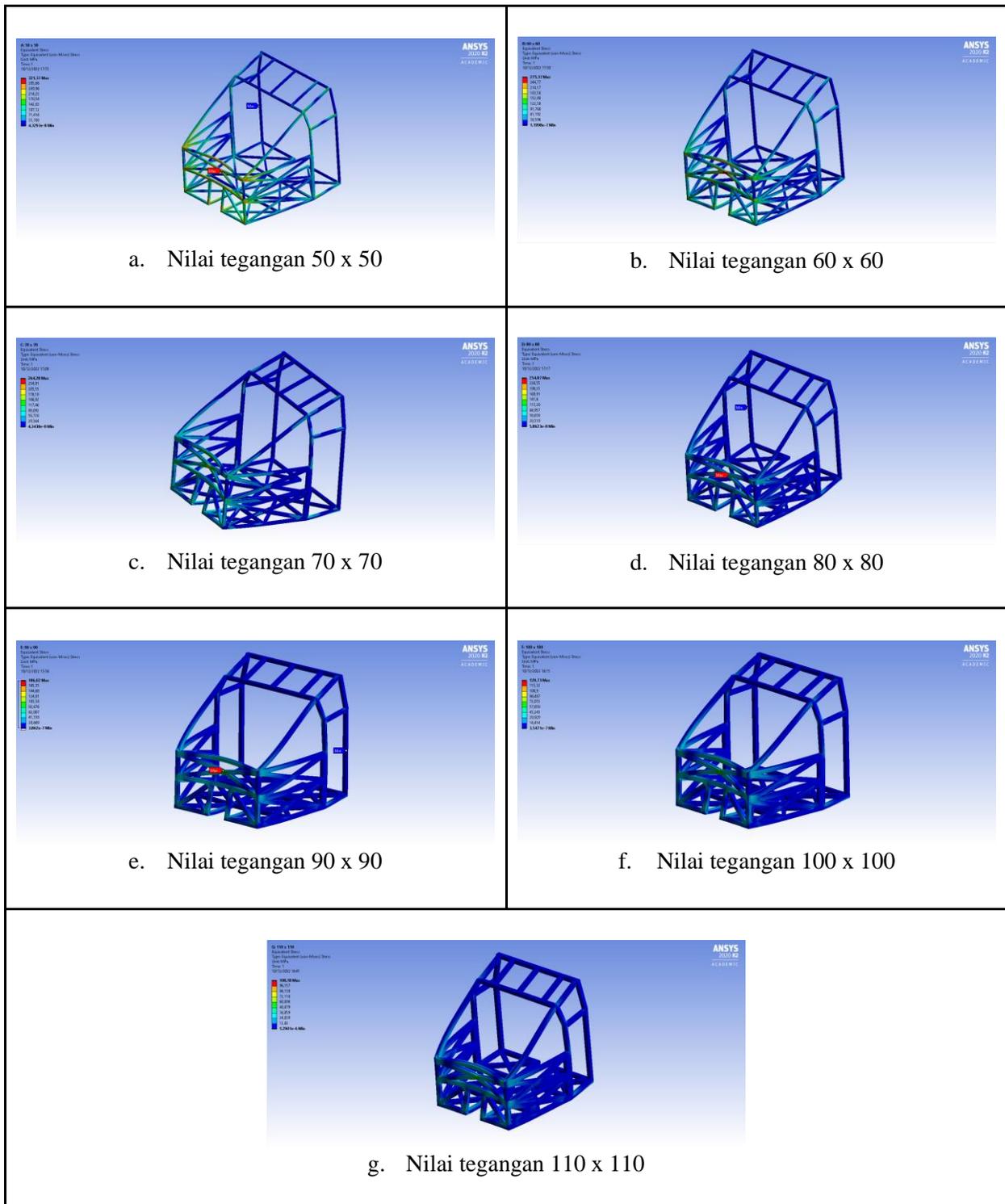
Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa semakin besar *cross-section* pada struktur maka semakin besar pula nilai *safety factor*, perlu ditentukan nilai *ultimate stress* dari suatu material. Artinya semakin kecil tegangan maksimum yang dialami suatu *beam* dan semakin jauh nilainya dari nilai *ultimate stress* maka diperoleh nilai *safety factor* yang lebih besar. Pada penelitian ini, target utama struktur *train nose* yang ingin dicapai adalah memiliki *safety factor* lebih besar dari 2. Berdasarkan Tabel 2 dapat dicapai nilai *safety factor* minimal 2 dengan 78mm x 78mm struktur minimal 110 mm x 110 mm. Variasi 78mm x 78mm dan 110 mm x 110 mm ini selanjutnya akan dioptimalkan dengan membuang bagian-bagian yang tidak menahan gaya berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan.

Pengaruh deformasi struktur dengan variasi 50 mm x 50 mm, 60 mm x 60 mm, 70 mm x 70 mm, 80 mm x 80 mm, 90 mm x 90 mm, 100 mm x 100 mm, dan 110 mm x 110 mm menggunakan *Ansys Structure* ditampilkan pada Gambar 5. Bagian atas tengah dari depan *train nose* mengalami deformasi yang signifikan. Ini menunjukkan bahwa deformasi maksimum memberikan tanda merah.



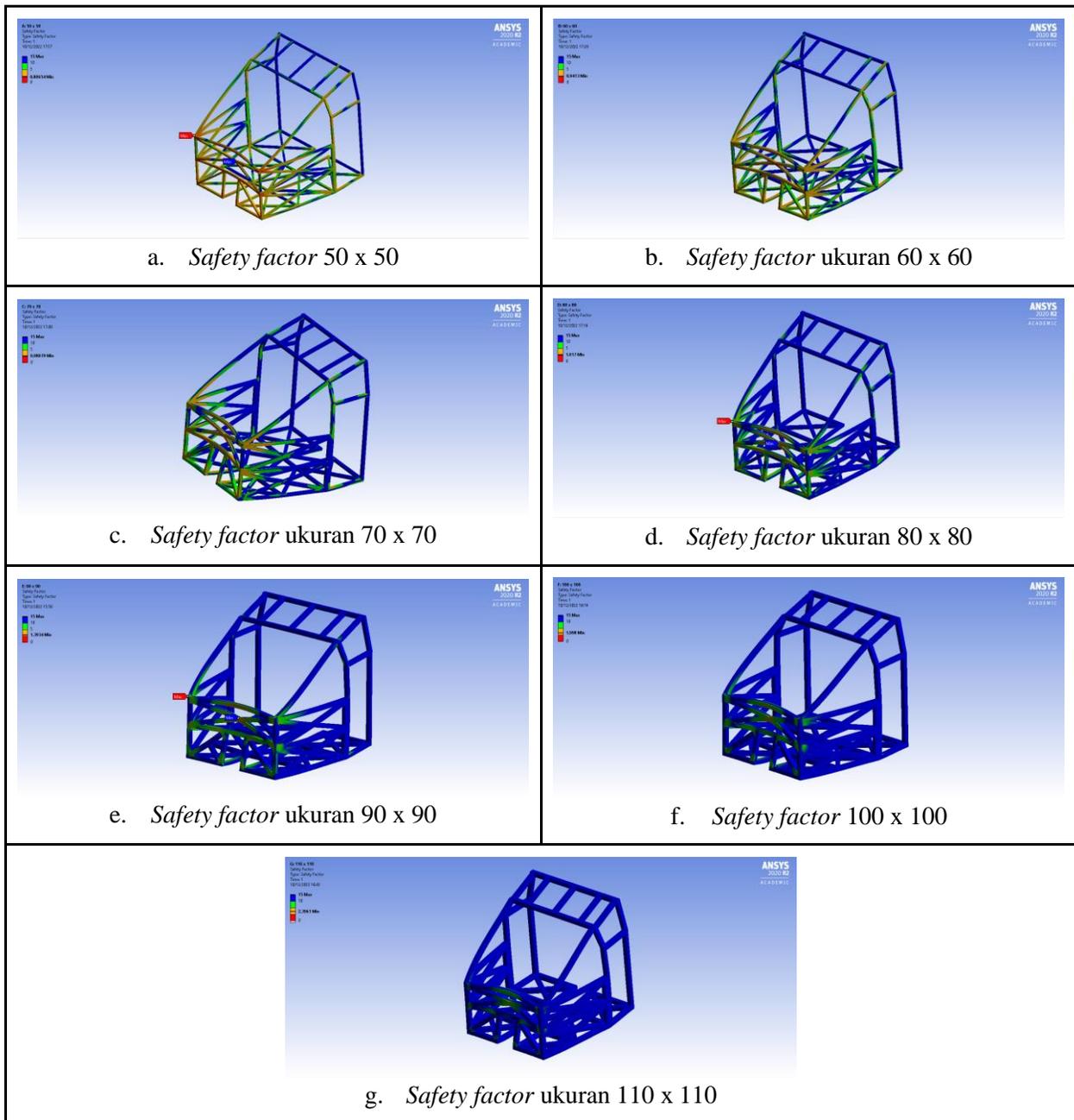
Gambar 6. Deformasi Struktur dengan Berbagai Ukuran

Nilai tegangan dari struktur dengan variasi 50 mm x 50 mm, 60 mm x 60 mm, 70 mm x 70 mm, 80 mm x 80 mm, 90 mm x 90 mm, 100 mm x 100 mm, dan 110 mm x 110 mm menggunakan *Ansys structure* telah ditampilkan pada Gambar 7.



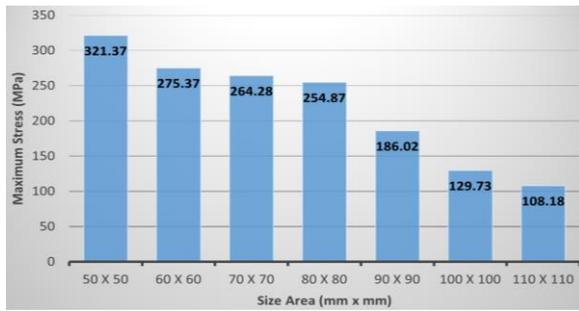
Gambar 7. Data Pembebanan Tegangan Struktur dengan Berbagai Ukuran

Safety factor berpengaruh pada struktur dengan variasi ukuran 50 mm x 50 mm, 60 mm x 60 mm, 70 mm x 70 mm, 80 mm x 80 mm, 90 mm x 90 mm, 100 mm x 100 mm, dan 110 mm x 110 mm menggunakan *Ansys structure*. Hasilnya ditampilkan pada Gambar 8.

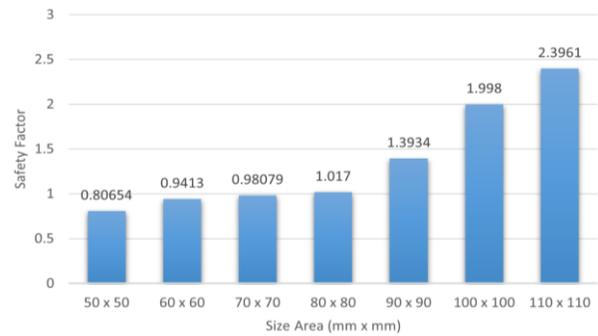


Gambar 8. Data *Safety Factor* Struktur 2 dengan Berbagai Ukuran

Analisis tren dari simulasi memiliki hubungan antara tegangan maksimum dan luas area pada Gambar 9. Terlihat bahwa ukuran 110 mm x 110 mm memiliki tegangan maksimum 108,18 Mpa karena pada ukuran ini momen inersianya paling besar. Pada simulasi akhir didapatkan *safety factor* sebesar 2,3961 pada luasan 110 mm x 110 mm. Ini menunjukkan semakin besar struktur, semakin besar *safety factor* yang kita dapatkan. Pada Gambar 10 dapat dilihat bahwa *safety factor* semakin meningkat, dengan luasan yang semakin besar. *Safety factor* dapat ditentukan oleh tegangan ultimate dari material. Semakin kecil tegangan maksimum dari *beam*, semakin besar *safety factor* yang kita dapatkan.



Gambar 9. Grafik Hasil Tegangan Maksimum



Gambar 10. Grafik Hasil Variabel Safety Factor

Optimasi ulang dilakukan pada struktur penampang yang berukuran 110 mm x 110 mm. Gambar 11 menunjukkan bahwa perubahan topologi dilakukan pada *train nose frame*. Terlihat bahwa pengurangan jumlah balok dilakukan pada bagian samping, atas, dan lantai struktur, namun dengan *safety factor* yang sama. Sedangkan struktur depan *train nose* diubah sedemikian rupa untuk mengurangi efek deformasi akibat beban kompresi yang diuji.

Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi
<p>Pandangan atas</p>	<p>Pandangan atas</p>
<p>Tampak belakang</p>	<p>Tampak belakang</p>
<p>Tampak samping</p>	<p>Tampak samping</p>
<p>Tampak depan</p>	<p>Tampak depan</p>

Gambar 11. Perubahan Bentuk Topologi *Train Nose Structure* Pada Proses Optimasi

4. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi yang ditinjau dari nilai deformasi, tegangan maksimum, dan *safety factor*, diperoleh penampang struktur minimum sebesar 110 mm x 110 mm. Optimasi ulang dilakukan pada ukuran 110 mm x 110 mm, dan diperoleh *safety factor* sebesar 2.3961 dari simulasi. Ini menunjukkan semakin besar struktur, semakin besar *safety factor* yang kita dapatkan. *Safety factor* dapat ditentukan oleh tegangan ultimate dari material. Semakin kecil tegangan maksimum dari balok, semakin besar *safety factor*. Analisis *trend stress test* menunjukkan ukuran 110 mm x 110 mm memiliki tegangan maksimum 108,18 Mpa karena pada ukuran ini momen inersianya paling besar.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada teman-teman, Jurusan Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada yang telah memfasilitasi komputer pribadi yang dapat digunakan untuk simulasi numerik dalam penelitian ini.

Referensi

1. Miyachi, T., Iida, M., Fukuda, T., & Arai, T. (2016). Gradien tekanan maksimum nondimensi dari gelombang kompresi terowongan yang dihasilkan oleh kereta sumbu simetris yang berjalan offset. *Jurnal Teknik Angin dan Aerodinamika Industri*, 157. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2016.07.015>
2. Miyachi, T., Kikuchi, K., & Hieke, M. (2022). Multistep train nose untuk mengurangi gelombang mikro-tekanan. *Jurnal Suara dan Getaran*, 520. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116665>
3. Ozawa, S., Uchida, T., & Maeda, T. (1978). Pengurangan Gelombang Tekanan Mikro yang Dipancarkan dari Tunnel Exit dengan Hood pada Masuk Tunnel. *Laporan Triwulan RTRI (Railway Technical Research Institute) (Jepang)*, 19 (2), 77–83.
4. Bogsjö, K., & Rychlik, I. (2009). Kerusakan kelelahan kendaraan yang disebabkan oleh jalan yang tidak rata. *Kelelahan dan Fraktur Material dan Struktur Rekayasa*, 32 (5). <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2009.01340.x>
5. Han, JW, Kim, JD, & Lagu, SY (2013). Evaluasi kekuatan fatik rangka bogie untuk kereta maglev perkotaan dengan uji fatik pada rig uji skala penuh. *Analisis Kegagalan Rekayasa*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.01.009>
6. Yao, SB, Guo, DL, Sun, ZX, Chen, DW, & Yang, GW (2016). Desain parametrik dan optimalisasi hidung kereta kecepatan tinggi. *Optimasi dan Rekayasa*, 17 (3). <https://doi.org/10.1007/s11081-015-9298-6>
7. “Spesifikasi Bahan - Paduan Aluminium 6005A T5 | Jasa Fabrikasi | Pengelasan | Caloundra | APAC.” <https://apacinfrastructure.com.au/material-specifications-6005a-t5-aluminium-alloy>. Diakses 14 Desember 2022.
8. JIS E 7105:2006/ AMANDEMEN 1:2011, Rolling stock - Metode pengujian beban statis untuk struktur bodi, 2011.
9. Christensen, PW, & Klarbring, A. (2008). Pengantar optimalisasi struktural. *Mekanika Padat dan Penerapannya*, 153. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8666-3_1
10. Ku, YC, Rho, JH, Yun, SH, Kwak, MH, Kim, KH, Kwon, H. bin, & Lee, DH (2010). Distribusi area penampang yang optimal dari hidung kereta berkecepatan tinggi untuk meminimalkan gelombang tekanan mikro terowongan. *Optimasi Struktural dan Multidisiplin*, 42 (6). <https://doi.org/10.1007/s00158-010-0550-6>
11. Lee, J., & Kim, J. (2008). Perkiraan optimalisasi bentuk hidung kereta berkecepatan tinggi untuk mengurangi gelombang mikrotekanan. *Optimasi Struktural dan Multidisiplin*, 35 (1). <https://doi.org/10.1007/s00158-007-0111-9>

12. Krajnović, S. (2009). Optimalisasi bentuk kereta berkecepatan tinggi untuk meningkatkan kinerja aerodinamis. *Prosiding Institusi Insinyur Mekanik, Bagian F: Jurnal Rail and Rapid Transit*, 223 (5). <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT251>
13. Krajnović, S., Helgason, E., & Hafsteinsson, HE (2012). Optimalisasi bentuk aerodinamis dari kereta berkecepatan tinggi. *Proses Perdata*, 98. <https://doi.org/10.4203/ccp.98.157>
14. Cui, Kai & Wang, XP & Hu, SC & Gao, TY & Yang, Guowei. (2012). Optimasi Bentuk Kereta Berkecepatan Tinggi dengan Kecepatan 500kph. 148. 187-197. 10.1007/978-3-642-27963-8_19.
15. Yao, S., Guo, D., & Yang, G. (2012). Desain optimalisasi aerodinamis tiga dimensi dari hidung kereta kecepatan tinggi berdasarkan GA-GRNN. *Ilmu Pengetahuan Teknologi China*, 55 (11). <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4934-2>
16. Ku, YC, Kwak, MH, Park, H.il, & Lee, DH (2010). Optimalisasi multi-tujuan dari bentuk hidung kereta berkecepatan tinggi menggunakan fungsi pemodelan kendaraan. *Pertemuan Ilmu Kedirgantaraan AIAA ke-48 Termasuk Forum Cakrawala Baru dan Eksposisi Kedirgantaraan*. <https://doi.org/10.2514/6.2010-1501>
17. Vytla, V.v., Huang, PG, & Penmetsa, RC (2010). Optimalisasi bentuk aerodinamis multi objektif dari hidung kereta kecepatan tinggi menggunakan model pengganti adaptif. *Konferensi Aerodinamika Terapan AIAA ke - 28, 1*. <https://doi.org/10.2514/6.2010-4383>
18. Yao, SB, Guo, DL, Sun, ZX, Yang, GW, & Chen, DW (2012). Optimalisasi multi-tujuan dari kepala kereta berkecepatan tinggi yang disederhanakan berdasarkan model Kriging. *Ilmu Pengetahuan Teknologi China*, 55 (12). <https://doi.org/10.1007/s11431-012-5038-8>