

Perancangan *Coupler* untuk LRT di Indonesia

Andhika Muttaqien Priyambodo dan Achmad Syaifudin
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) 60111 Indonesia
e-mail: saifudin@me.its.ac.id

Abstrak—PT INKA menggunakan *coupler* tipe *knuckle*, yang biasa dipakai untuk kereta api, untuk sambungan gerbong pada kereta ringan (*light rail transit*, LRT). Namun, pemakaian *coupler* tipe ini sangat tidak sesuai sebab *coupler* untuk kereta api dapat menarik beban hingga 42 ton, sedangkan berat gerbong LRT hanya 25 ton. Dalam penelitian ini, dilakukan studi numerik untuk *re-design* ukuran *coupler*. Optimasi ukuran dipilih sebagai basis dalam metode *re-design*. Analisis numerik dilakukan dengan bantuan Catia Simulia V6 – *Structural Validation*. Material yang digunakan adalah AAR M201 grade E dan grade D sesuai dengan yang digunakan oleh PT INKA. Beban yang diterapkan adalah beban aktual LRT Jabodebek dengan jumlah *trainset* 6 buah. Optimasi ukuran dilakukan dengan reduksi ukuran *head coupler knuckle* hingga 50%. Panjang leher *coupler* dipertahankan untuk menyesuaikan dengan ruang sambungan pada *carbody*. Analisis angka keamanan dilakukan pada tiap model yang telah direduksi. Hasil simulasi mengindikasikan bahwa ukuran *coupler* yang paling optimum, yaitu ukuran pada skala reduksi 80% dari model awal. Tegangan tarik dan tekan maksimum yang terjadi berturut-turut sebesar 450 MPa dan 308 MPa, yang mana masih berada dalam zona aman.

Kata Kunci— Catia Simulia V6, *knuckle coupler*, *light rail transit*, *size optimization*.

I. PENDAHULUAN

Kereta ringan atau *light rail transit* (LRT) membutuhkan desain yang ringan namun kuat layaknya pesawat terbang. Desain yang ringan dan kuat diperlukan karena LRT termasuk moda transportasi publik yang berjalan di atas tanah (*elevated*). Semakin berat struktur LRT dapat menambah beban infrastruktur yang menopangnya. Salah satu komponen penting LRT adalah *coupler* atau biasa disebut sebagai sambungan gerbong. Sementara ini dalam pengoperasian LRT Palembang, PT INKA menggunakan *coupler* tipe *knuckle* yang biasa digunakan untuk kereta api, yang mana dapat menarik gerbong hingga 42 ton. Akibatnya, *coupler* tersebut menjadi *over capacity* karena digunakan untuk menarik gerbong LRT yang kurang dari 25 ton. Oleh karena itu, studi untuk mendesain ulang *coupler* tersebut menjadi sangat penting.

Penelitian terdahulu telah dilakukan, salah satunya oleh Wang et al. Mereka meneliti distribusi tegangan pada *knuckle coupler* yang digunakan kereta pengangkut barang sehingga dapat dilakukan *improvement* terhadap keamanan serta durasi masa gunanya [1]. Sedangkan untuk tipe *knuckle jaw*, Chunduru et al. menganalisis kemungkinan kegagalan yang terjadi akibat tingkat konsentrasi tegangan yang tinggi pada permukaan bagian dalam *knuckle jaw* [2]. Penelitian lain dilakukan oleh Steed dan Kimpton, yang mana menganalisis peningkatan kekuatan statik pada *coupler knuckle* [3]. Selain itu, ada beberapa penelitian terdahulu melalui simulasi metode elemen hingga dalam memodelkan pembebanan

terhadap *mechanical coupler* [4]–[6]. Namun, hingga saat ini penulis belum menemukan studi numerik yang dilakukan untuk *re-design* ukuran *coupler*.

Salah satu cara metode perancangan ulang adalah dengan metode optimasi ukuran. Metode ini terbilang masih jarang pada industri di Indonesia yang kebanyakan hanya melakukan pembuatan dengan jenis desain yang sudah *fix*. Penggunaan metode ini mampu menghasilkan produk yang lebih akurat, yakni dengan cara menentukan geometri *coupler* yang paling optimum tanpa melewati batas *ultimate tensile strength* dari material *coupler* itu sendiri. Dengan demikian, penelitian ini mengusulkan untuk merancang ulang *coupler knuckle* dari segi ukurannya sesuai dengan beban aktual yang diterima. Komponen *coupler* pada LRT ini merupakan komponen yang sangat penting karena harus dapat menahan beban setiap gerbong saat sedang melaju membawa penumpang dan harus memiliki standar keamanan yang cukup tinggi karena menyangkut keselamatan dari setiap penumpang tersebut. Oleh karena itu, perancangan ulang dengan metode optimasi ukuran dari *coupler* ini penting untuk diperhatikan, baik dari segi kekuatan optimum maupun dari segi keamanannya.

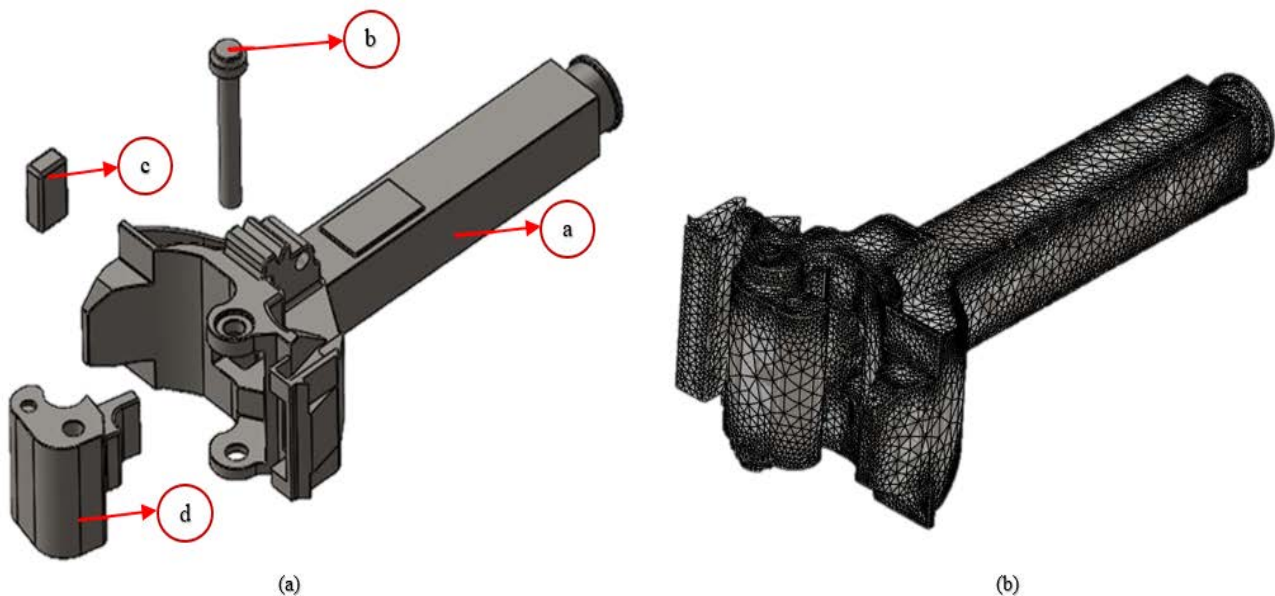
II. METODE PENELITIAN

A. Model Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja cor AAR M201 grade E untuk bagian *knuckle jaw*, *locking pin* dan *hinge pin*. Sedangkan untuk bagian *body* menggunakan baja cor AAR M201 grade D. Perbedaan dari kedua material ini berada pada kualitas *forging* yang diterima, sehingga pada grade E memiliki *tensile ultimate strength* yang lebih tinggi. Material ini termasuk baja cor paduan rendah yang telah melalui proses *quenching*, yaitu proses pendinginan dengan cepat setelah material dipanaskan di atas temperatur kritisnya. Selanjutnya dilakukan proses *tempering* untuk mengeraskan material tersebut [7]. Model material dari kedua material ini adalah isotropik yang memiliki kesamaan sifat ketika mendapat pem-bebanan dari arah yang berbeda. Material ini biasa digunakan pada alat-alat berat karena tersusun dari mikrostruktur martensite yang halus dan merata sehingga material tersebut memiliki ketangguhan yang tinggi [2].

Tabel 1.
Material properties AAR M201

Parameter	Grade E	Grade D
Young's Modulus (MPa)	2×10^5	2×10^5
Poisson's Ratio	0,3	0,3
Massa Jenis (kg/mm ³)	$7,83 \times 10^{-6}$	$7,83 \times 10^{-6}$
Kekuatan Luluh (MPa)	689	583
Kekuatan Tarik Maksimum (MPa)	827	720



Gambar 1. (a) Bagian inti dari *coupler knuckle* (b) Tampilan *meshing* dari model *coupler knuckle*.

B. Model Solid 3D dan Meshing

Model solid 3D yang digunakan adalah model *coupler knuckle* milik PT. INKA yang telah dilakukan proses penyesuaian pada bagian dudukannya sehingga dapat digunakan dengan *shock-absorber* LRT. Sambungan ini memiliki 4 bagian inti seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1a, yaitu:

- Body*, bagian utama tempat komponen lain bertumpu, serta tempat duduk agar dapat tersambung pada bagian *shock-absorber* LRT.
- Hinge Pin*, poros utama tempat *knuckle* atau pengait berotasi sehingga dapat berubah posisi dari tahap *ready to couple* ke tahap *coupled*.
- Locking Pin*, berfungsi sebagai pasak untuk mengunci posisi *knuckle jaw* saat tersambung sehingga tidak dapat berotasi dengan bebas dan terlepas dengan sambungannya. Oleh karena itu *locking* menjadi tumpuan utama saat tahap tersambung.
- Knuckle jaw*, berbentuk seperti pengait, berfungsi untuk mencengkram *knuckle jaw* pasangannya sehingga saat berpasangan kedua *coupler* tidak mudah terlepas.

Simulasi yang dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak Catia Simulia V6 dengan fitur *structural validation*, dimana hasil proses *meshing* ditunjukkan pada Gambar 1b. Proses *meshing* pada Catia Simulia V6 memiliki tingkat kehalusan *medium* dengan *refinement* 12. Diskritisasi ini sudah cukup untuk mendapatkan hasil yang akurat sesuai yang disarankan oleh Catia Simulia V6 [8].

C. Kondisi Batas dan Pembebanan

Kondisi batas pada penelitian ini adalah batasan-batasan yang diterapkan pada model elemen hingga untuk mewakili beban dan tumpuan yang terjadi pada model pada keadaan yang sebenarnya, sehingga simulasi yang dilakukan tidak terlalu meluas dan memiliki hasil yang mendekati kondisi di lapangan.

Beberapa kondisi batas pada simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 2, yaitu:

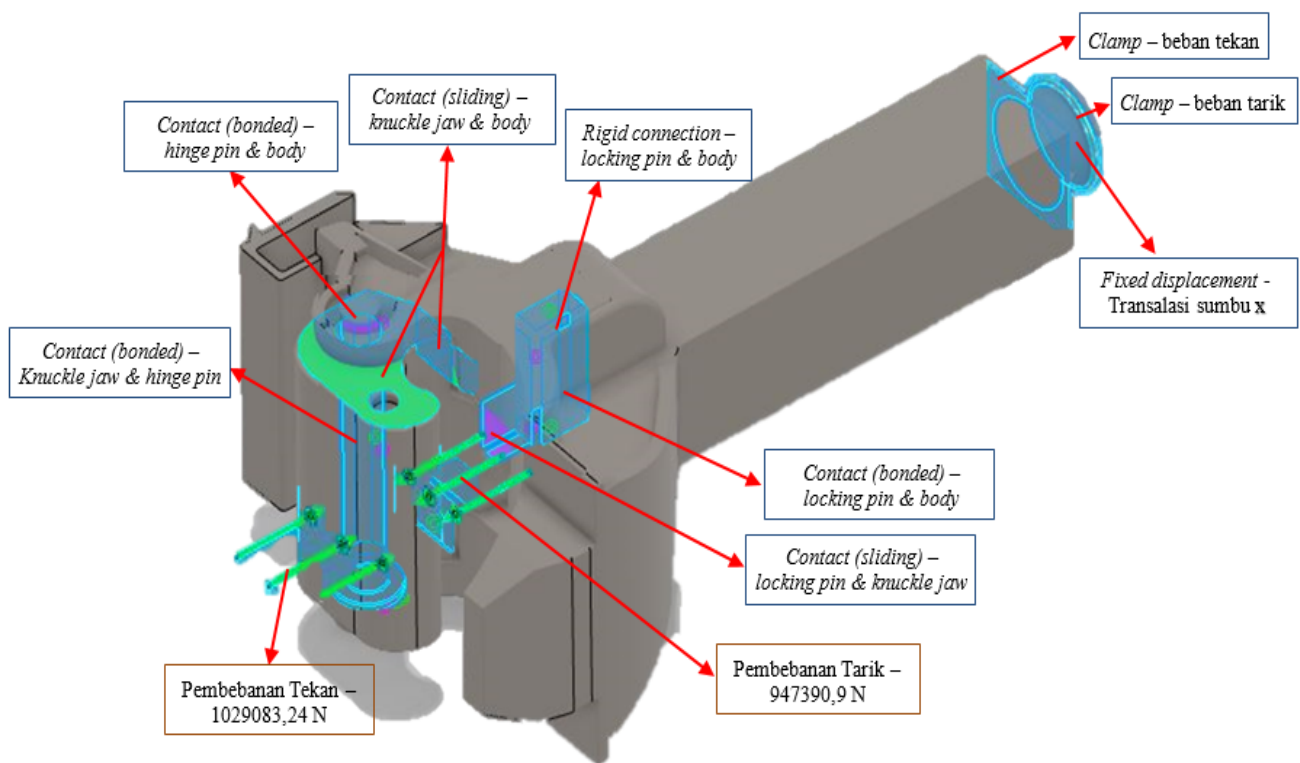
- Contact* adalah hubungan permukaan yang bersentuhan dari satu bagian ke bagian lainnya, pada Catia Simulia V6

kontak dibagi menjadi 2 jenis, *sliding* dan *bonded*. Berikut adalah hubungan permukaan antar bagian dan kondisi kontakannya:

- Knuckle jaw* dengan *body*, kondisi *sliding*
 - Locking pin* dengan *body*, kondisi *bonded*
 - Locking pin* dengan *knuckle jaw*, kondisi *sliding*
 - Knuckle jaw* dengan *hinge pin*, kondisi *sliding*
 - Hinge pin* dengan *body*, kondisi *bonded*
- Connection* adalah hubungan antar bagian yang mendefinisikan cara pembebanan tersalurkan dari komponen satu ke komponen lainnya. Kondisi yang digunakan adalah *rigid connection* pada permukaan *locking pin* dengan *body*.
 - Restraints* adalah kondisi yang membatasi gerak dari benda tersebut, dalam simulasi ini berarti tumpuan-tumpuan yang ada. Pada model simulasi ini digunakan tumpuan *clamp* pada bagian *mounting* dengan 2 tipe, saat pembebanan tarik dan tekan. Pada kedua pembebanan terdapat *fixed displacement* dengan translasi sumbu X pada permukaan vertikal *mounting*.
 - Load* adalah pembebanan yang terjadi sesuai dengan kondisi di lapangan. Pembebanan sendiri dilakukan secara 2 tipe, pembebanan tarik saat LRT mengalami kerusakan dan harus ditarik oleh bantuan lokomotif *maintenance*, dan pembebanan tekan saat lokomotif *maintenance* tersebut melakukan pengereman [9]. Posisi pembebanan tarik berada pada bagian *knuckle* dengan arah z (+), dan saat pembebanan tekan berada pada bagian *knuckle* dan *body* dengan arah z (-).

D. Tipe Analisis dan Kontrol Solusi

Analisis yang digunakan pada simulasi ini adalah analisis statik, yang berarti semua kondisi pembebanan terjadi secara konstan pada setiap waktu. Untuk mendapatkan besar pembebanan tarik dan tekan diperlukan gaya gesek dari setiap gerbong LRT. Koefisien gesek rata-rata yang terjadi antara rel dan roda gerbong adalah 0.3, dengan kondisi rel kering tidak diberikan pelumas sama sekali [10]. Hal ini sesuai dengan kondisi rel dan roda gerbong pada LRT



Gambar 2. Kondisi batas dan pembebanan pada simulasi pembebanan tarik dan tekan.

Dengan kondisi penumpang penuh dan berat penumpang menggunakan berat rata-rata orang Asia sebesar 57,7 Kg [11], sehingga gaya gesek dari setiap gerbong seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

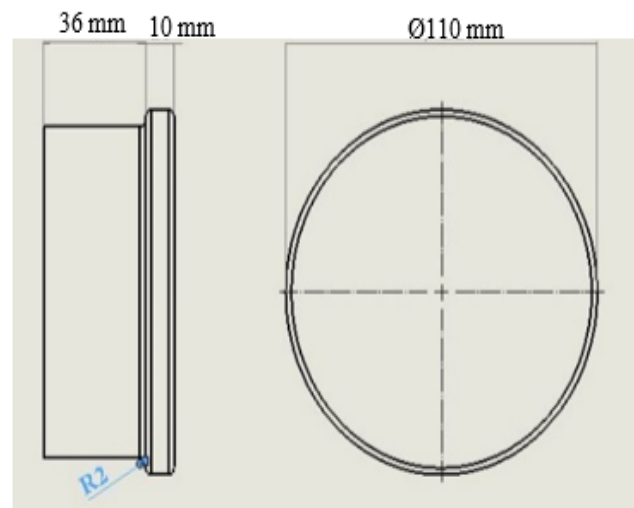
Tabel 2.
Gaya gesek pada setiap tipe gerbong

Kondisi	Motor Car	Main Car	Trailer Car
Kosong	27200 Kg	27200 Kg	28000 Kg
Jumlah Penumpang	206 Orang	224 Orang	224 Orang
Berat Penumpang	57,7 Kg/Orang	57,7 Kg/Orang	57,7 Kg/Orang
Penuh	39086,2 Kg	40124,8 Kg	40924,8 Kg
Gaya Gesek	115030,7 N	118087,3 N	120441,7 N

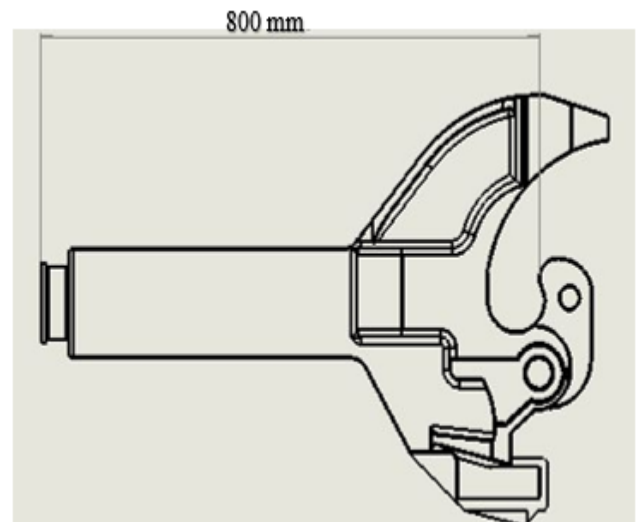
Pembebanan tarik terjadi pada setiap gerbong sehingga didapat gaya tarik terbesar, yaitu pada gerbong paling depan sebesar 947390,9 N. Sedangkan pembebanan tekan terjadi saat lokomotif melakukan pengereman sehingga sambungan paling depan menahan gaya akibat perlambatan. Gaya tekan terbesar berada pada coupler paling depan sebesar 1029083,24 N.

Kontrol solusi dibagi menjadi 2 bagian, yaitu konstanta iterasi dan variasi iterasi. Konstanta variasi adalah variabel yang tidak dirubah pada setiap variasinya atau dengan kata lain variabel tersebut dijaga tetap sama. Sedangkan variasi iterasi adalah variabel yang diatur dan dirubah pada setiap variasinya untuk mencari ukuran yang paling optimum pada simulasi ini.

Konstanta iterasi pada model ini ada 2, yaitu ukuran dudukan dan panjang leher *coupler*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Ukuran dudukan dipertahankan agar pada setiap model optimasi dapat tetap tersambung dengan bagian *shock-absorber* LRT. Sedangkan panjang leher *coupler* dibuat konstan agar jarak antar gerbong tetap sama sehingga tidak merubah komponen lain yang berhubungan langsung dengan jarak antar gerbong.



Gambar 3. Ukuran *mounting* yang tidak berubah pada setiap iterasinya



Gambar 4. Ukuran panjang tetap 800 mm pada setiap iterasinya

Variabel yang berubah pada variasi iterasi adalah ukuran setiap bagian dari kepala *coupler* itu sendiri. Besaran ukuran yang divariasikan dilakukan secara skala dengan perbedaan 10% dari setiap iterasinya, dengan L total lebar, dan T total tinggi *coupler*.

Tabel 3.
Variasi ukuran setiap iterasi

Iterasi ke-	Skala ukuran	Ukuran (mm)	
		L	T
1	100%	592	355,5
2	90%	532,8	320
3	80%	473,6	284,4
4	70%	414,4	249
5	60%	355,2	213,3
6	50%	296	178

III. HASIL DAN ANALISIS

A. Iterasi Massa

Untuk variasi massa dari setiap model skala adalah sebagai berikut:

Tabel 4.
Variasi massa pada setiap variasi model skala

Iterasi	Berat (Kg)
100%	301,46
90%	283,71
80%	269,51
70%	258,44
60%	250,13
50%	244,17

B. Utilisasi Tegangan Tarik dan Tekan

Persamaan utilisasi tegangan tarik dan tekan adalah persamaan dimana tegangan tarik dan tekan yang terjadi dikalikan dengan faktor keamanannya dan selanjutnya dibandingkan dengan tegangan tarik dan tekan yang diperbolehkan oleh material tersebut. Apabila hasil dari perbandingan tersebut kurang atau sama dengan 1, maka utilisasi tegangan tersebut diizinkan atau dengan kata lain tegangan yang terjadi masih di dalam batas aman. Persamaan utilisasi tegangan sendiri adalah sebagai berikut [9] :

$$U_{utilisasi} = \frac{\sigma_T S_2}{R_{mT}} \leq 1 \tag{1}$$

dimana σ_T adalah tegangan tarik maksimum yang terjadi (MPa), S_2 adalah faktor keamanan dan R_{mT} adalah tegangan tarik maksimum material tersebut (MPa). Dengan demikian, tegangan yang terjadi tidak boleh melebihi batas amannya, yaitu :

Tabel 5.
Utilisasi Tegangan yang Diizinkan

Utilisasi Tegangan	Batas Tegangan (MPa)
$U_{tarik\ grade\ E\ steel}$	551,3

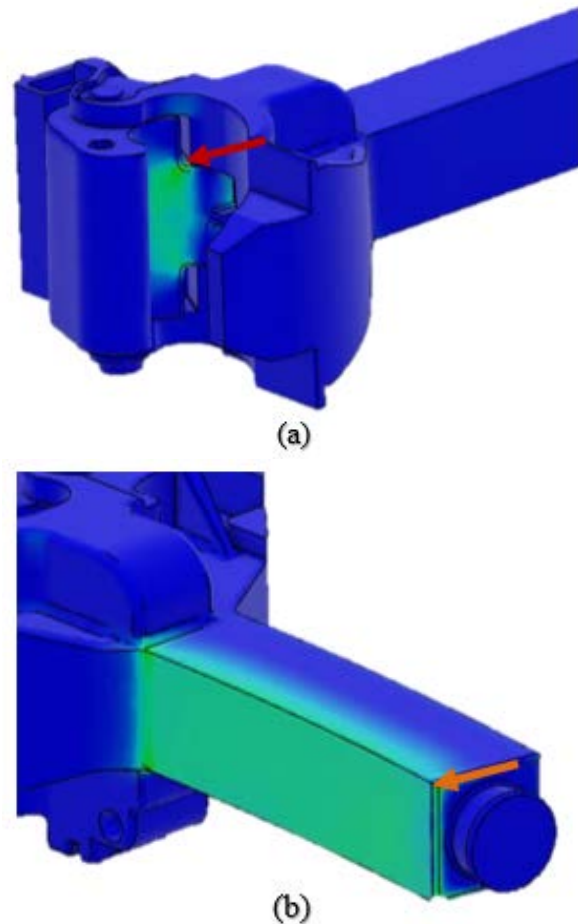
$$U_{tekan\ grade\ E\ steel} = 459,3$$

$$U_{tarik\ grade\ D\ steel} = 480$$

$$U_{tekan\ grade\ D\ steel} = 388,7$$

C. Titik Kritis

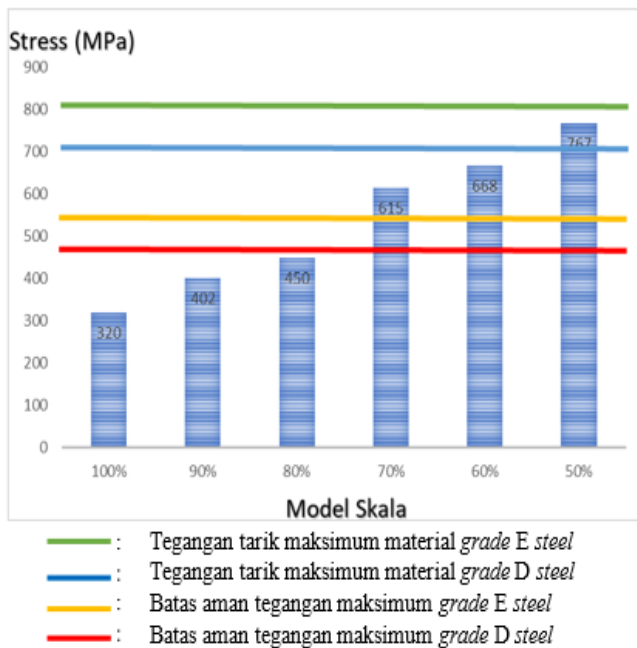
Hasil simulasi pembebanan tarik dan tekan dari setiap model memiliki kecenderungan yang sama yaitu memiliki titik kritis pada posisi yang sama. Untuk pembebanan tarik, setiap model simulasi memiliki tegangan maksimum yang berada pada bagian lekukan *knuckle jaw* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5a dengan panah warna merah. Untuk pembebanan tekan, posisi titik kritisnya berada pada bagian dudukan yang memiliki tegangan tekan maksimum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5b dengan panah warna jingga.



Gambar 5. (a) Titik kritis pada saat pembebanan tarik (b) Titik kritis pada saat pembebanan tekan

Bila dibandingkan dengan hasil penelitian oleh Wang et al, kedua simulasi pembebanan tarik ini memiliki posisi titik kritis yang hampir sama yaitu pada bagian lekukan *knuckle jaw*, walaupun besaran tegangan maksimumnya cukup berbeda, hal ini dapat dikarenakan perbedaan besar pembebanan yang diaplikasikan dari kedua simulasi [1].

D. Analisis Variasi Tegangan Tarik

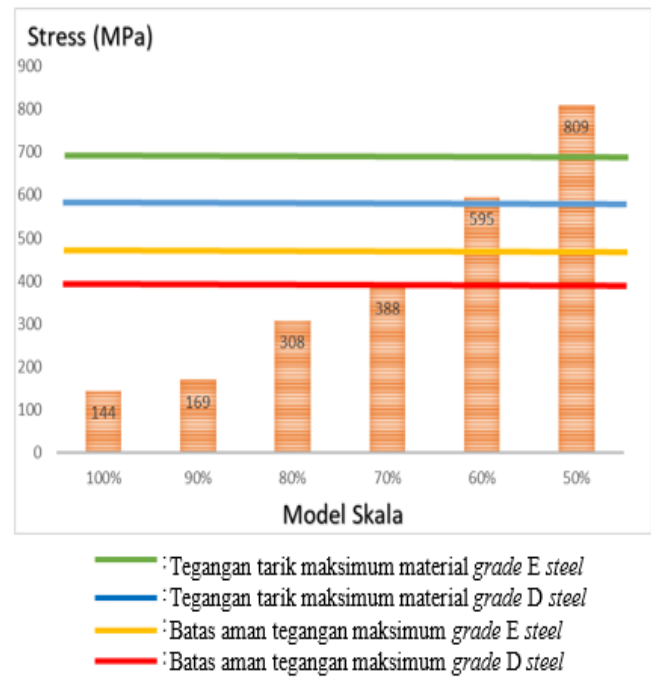


Gambar 6. Grafik variasi tegangan tarik yang terjadi pada setiap variasi model skalanya

Gambar 6 menampilkan variasi tegangan tarik pada masing-masing model skala. Model skala 100%, 90%, dan 80% memiliki hasil simulasi dengan tegangan tarik masih dibawah batas aman dari kedua material. Perbedaan tegangan tarik yang cukup signifikan terjadi antara model skala 80% dan skala 70%. Pada model skala 70% dan 60%, tegangan tariknya sudah melebihi batas aman dari kedua material, walaupun masih dibawah tegangan tarik maksimum yang mampu ditahan oleh kedua material tersebut. Pada model skala 50%, tegangan maksimum yang terjadi telah melebihi tegangan tarik maksimum yang mampu di tahan oleh material grade D, tetapi masih berada di bawah *ultimate tensile strength* dari material grade E. Oleh karena itu, variasi model skala 80% merupakan model yang memiliki ukuran minimum yang memiliki tegangan tarik masih di bawah batas amannya.

E. Analisis Variasi Tegangan Tekan

Variasi tegangan tekan pada model skala 100%, 90%, 80%, dan 70% mengalami tegangan tekan yang masih di bawah batas amannya dari kedua material, baik grade E steel maupun grade D steel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Perbedaan tegangan tekan sangat signifikan antara model skala 70% dan 60%. Ketika model skala 60% diberikan beban tekan, menghasilkan tegangan tekan yang melebihi kapasitas yang mampu ditahan oleh material grade D steel, tepat pada bagian body. Begitu pula pada model skala 50%, tegangan maksimum yang terjadi sangat tinggi hingga melebihi kekuatan tegangan tekan yang dimiliki oleh kedua material tersebut. Dengan demikian, model skala 70% merupakan model yang memiliki ukuran paling minimum yang mampu menahan tegangan. Meskipun demikian, pada utilisasi tegangan tarik, model 70% tidak diperbolehkan, oleh karena itu model skala 80% merupakan model yang paling optimum yang diperbolehkan baik dari utilisasi tegangan tarik dan utilisasi tegangan tekan.



Gambar 7. Grafik variasi tegangan tekan yang terjadi pada setiap variasi model skalanya

F. Analisis Buckling

Analisis *buckling* dilakukan secara analitik [12][13]. *Buckling* terjadi pada saat *coupler* diberikan beban tekan dengan konsentrasi tekuk terjadi pada batang *body*. Bentuk penampang batang *body* model skala 80% adalah batang *hollow* persegi dengan sisi luar 121,6 mm dan sisi dalam 96 mm, dan panjang batang 503,4 mm. *Buckling* dikatakan masih di dalam batas amannya apabila beban tekan yang terjadi kurang dari beban kritis *buckling* yang dimiliki oleh batang tersebut. Perhitungan beban kritis *buckling* memiliki persamaan sebagai berikut:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(K \frac{L}{r_g})^2} \cdot A \tag{2}$$

Dimana P_{cr} adalah beban kritis *buckling* (N), E adalah modulus elastisitas (N/mm²) dan K adalah *effective length factor*. Hasil perhitungan analitik menunjukkan bahwa *buckling* yang terjadi pada batang masih sangat aman karena beban tekan yang terjadi pada batang sebesar 1029 kN, masih jauh dibawah beban kritis *buckling* yang sebesar 19677,37 kN.

G. Analisis Tingkat Keamanan Hasil Re-design

Untuk perhitungan tingkat kemananan didapatkan dari persamaan sebagai berikut [14]:

$$Safety\ Factor_{re-design} = \frac{R_m}{\sigma} \tag{3}$$

dimana R_m adalah tegangan maksimal yang dapat diterima oleh material tersebut (MPa), dan σ adalah tegangan maksimum yang terjadi dari hasil simulasi. Melalui persamaan diatas, didapat tingkat keamanan saat pembebanan tarik sebesar 1,6, dan tingkat keamanan saat pembebanan tekan sebesar 1,89. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa model *knuckle coupler* hasil *re-design* dengan skala 80% masih di dalam batas amannya, ketika diberikan pembebanan tarik maupun tekan, karena tingkat keamanan hasil *re-design* masih di atas faktor keamanan pada standar yaitu 1,5 [9].

IV. KESIMPULAN

Knuckle coupler model skala 80% merupakan ukuran yang paling optimum yang dapat menahan beban tarik dan tekan pada sambungan LRT saat mengalami kerusakan, sehingga harus ditarik dengan bantuan lokomotif *maintenance*.

Hasil optimasi ukuran ini dapat mengurangi beban dari massa *knuckle coupler* itu sendiri, yang semulanya memiliki bobot 301,46 Kg menjadi 269,51 Kg. Selain itu, kebutuhan material untuk produksi juga berkurang, dari semula memerlukan volume 38500,36 cm³, menjadi cukup 34419,66 cm³. Manfaat utama yang diharapkan adalah PT INKA dapat menggunakan *shock-absorber* yang diperuntukan untuk LRT dengan bagian *draw head* yang diproduksi secara mandiri dari hasil perancangan *knuckle coupler* pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. X. Wang, X. S. Bu, L. J. Li, and L. L. Zhu, "The Finite Element Analysis of New Forged Coupler Knuckle," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 367, pp. 122–125, 2013.
- [2] S. P. Chunduru, M. J. Kim, and C. Mirman, "Failure analysis of railroad couplers of AAR type E," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 18, no. 1, pp. 374–385, 2011.
- [3] J. Steed, "Improving the 10" Head Alliance Coupler and Knuckle," 2015.
- [4] W. Ma, S. Luo, and R. Song, "Coupler dynamic performance analysis of heavy haul locomotives," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 50, no. 9, pp. 1435–1452, 2012.
- [5] Z. Xu, W. Ma, Q. Wu, and S. Luo, "Analysis of the rotation angle of a coupler used on heavy haul locomotives," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 228, no. 8, pp. 835–844, 2014.
- [6] Q. Tianwei, M. Weihua, W. Dong, and L. Shihui, "Influence of coupler and buffer on dynamics performance of heavy haul locomotive," *Open Mech. Eng. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 1033–1038, 2015.
- [7] Steel Founders' Society of America, *Steel Castings Handbook Supplement 2*. Illionis, 2009.
- [8] Dassault Systèmes, "3DEXPERIENCE User Assistance R2018x." Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, 2017.
- [9] European Committee for Standardization, "Structural Requirements of Railway Vehicle Bodies," *Railw. Appl.*, no. EN-12663-1, pp. 16–27, 2010.
- [10] J. Lundberg, M. Rantatalo, C. Wanhainen, and J. Casselgren, "Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions," *Wear*, vol. 324–325, pp. 109–117, 2015.
- [11] S. C. Walpole, D. Prieto-Merino, P. Edwards, J. Cleland, G. Stevens, and I. Roberts, "The weight of nations: An estimation of adult human biomass," *BMC Public Health*, vol. 12, no. 1, 2012.
- [12] R. Hibbeler, *Mechanics of Materials 8th edition*. New Jersey: Perason Prentice-Hall, 2013.
- [13] J. E. Shigley, C. R. Mischke, and R. G. Budynas, *Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill Education, 2008.
- [14] C. D. Deutschman, Aaron. J. Michels, Walter. E. Wilson, *Machine Design Theory and Practice*. United State of America, 1975.