

Optimasi Ketebalan Dinding Sel Dan Material Inti *Sandwich Honeycomb Board* Pada Pintu KRL *Commuter Line* Menggunakan Metode Elemen Hingga

Thomas Tanto Ardianata^a, Agus Susanto^{a*}, Rahayu M. Bisono^a, Kholis Nur Faizin^b, C. H. Radityo^c

^aTeknik Perkeretaapian, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun
Jl. Serayu No 84 Madiun, Jawa Timur, Indonesia 63133

^bTeknik Rekayasa Otomotif, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun
Jl. Serayu No 84 Madiun, Jawa Timur, Indonesia 63133

^cDepartemen Desain, Divisi Teknologi, PT. Industri Kereta Api (Persero)
Jl Yos Sudarso No. 71 Madiun, Jawa Timur, Indonesia 63122

*E-mail: agus_eng.dept@pnm.ac.id

Abstract

One of the important mechanical parts of the Commuter Line electric train (KRL) that must be considered in designing is the door. This is because it experiences lateral loads when the train is operating. KRL doors consist of a frame, outer layer as skin, glass, and filling material which is usually filled with a honeycomb sandwich structure. As a door filling material, the honeycomb sandwich board has the largest volume compared to other door components, causing it to be heavier. This study focuses on optimizing the thickness of the cell wall to reduce the weight of the honeycomb sandwich board while still maintaining its mechanical strength and safety. Optimization was carried out using the finite element method (MEH) by comparing 6 door models. The thickness of the cell wall was varied between 0.0508; 0.0635; and 0.0762 mm with polypropylene and aluminum alloy 5052-H34 used as the material. Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10 (R)) on "Entrance Door for Electric Car" and the Law of Indonesia Transportation Minister, PM. 175, 2015 on "Standard Technical Specification for Self-Propelled Normal Speed Trains" was adopted in the numerical calculation (MEH). The results showed that the door of the Commuter Line model 1 showed a weight reduction of up to 1.95% from the existing model, with a total weight of 31,816 kg. With a load of 588.4 N, the door design experienced a stress of 21 MPa and a deflection of 1.33 mm (maximum). When the load was 980.67 N, the door design experienced a stress of 35 MPa and a maximum deflection of 2.2 mm. With both loads, the proposed design still met the regulations of the Minister of Transportation.

Kata kunci: Sandwich Honeycomb, Polypropylene, AA 5052-H34, Finite Element Method

Abstrak

Salah satu bagian mekanis penting dari kereta rel listrik (KRL) *Commuter Line* yang harus mendapatkan diperhatikan dalam desain adalah pintu. Hal ini karena komponen ini mengalami beban lateral saat kereta berjalan. Pintu KRL tersusun atas rangka (*frame*), lapisan luar (*skin*), kaca, dan material pengisi yang biasanya diisi dengan struktur *sandwich honeycomb*. Sebagai material isian pintu, *sandwich honeycomb board* memiliki volume terbesar dibandingkan komponen penyusun pintu lainnya, sehingga menyebabkan pintu menjadi lebih berat. Studi ini berfokus pada optimasi ketebalan dinding sel untuk mengurangi berat *sandwich honeycomb board* namun tetap menjaga kekuatan sifat mekanik dan keamanannya. Optimasi dilakukan menggunakan metode elemen hingga (MEH) dengan cara membandingkan 6 model pintu. Ketebalan dinding sel divariasi antara 0,0508; 0,0635; dan 0,0762 mm dengan material *polypropylene* dan *aluminium alloy 5052-H34*. *Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10(R))* tentang "Entrance Door for Electric Car" dan Permen Perhubungan - PM. 175, 2015 tentang "Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal dengan Penggerak Sendiri" diadopsi dalam perhitungan numerik (MEH). Hasil menunjukkan bahwa pintu KRL *Commuter Line* model 1 menunjukkan pengurangan berat hingga 1,95% dari model *existing*, dengan berat total 31,816 kg. Dengan pembebanan sebesar 588,4 N, desain pintu mengalami tegangan sebesar 21 MPa dan terdefleksi 1,33 mm (maksimum). Saat pembebanan sebesar 980,67 N, desain pintu mengalami tegangan sebesar 35 MPa dan terdefleksi maksimum sebesar 2,2 mm. Dengan kedua pembebanan tersebut, desain yang diajukan tetap memenuhi peraturan Permen Perhubungan.

Kata kunci: Sandwich Honeycomb, Polypropylene, AA 5052-H34, Metode Elemen Hingga

1. Pendahuluan

Kereta Rel Listrik (KRL) merupakan moda transportasi yang banyak digunakan masyarakat Indonesia terutama di kota-kota besar, seperti Jakarta, Solo, Surabaya, dan Semarang. Untuk menambah kapasitas angkut serta mendukung program pemerintah untuk meningkatkan produksi dalam negeri serta substitusi impor melalui Program Peningkatan

Pengguna Produk Dalam Negeri (P3DN), PT Kereta Commuter Indonesia sebagai penyedia angkutan penumpang KRL *Commuter* memesan sebanyak 16 rangkaian kereta (*train set*) kepada PT INKA [1]. Pengerjaan KRL baru pesanan PT Kereta Commuter Indonesia saat ini masih dalam tahap pengembangan.

Pintu merupakan salah satu komponen terpenting dalam kereta api. Pintu kereta berfungsi sebagai akses naik dan turunnya penumpang kereta pada saat berhenti [2] Pintu juga harus bisa memberi keamanan dan keselamatan kepada penumpang saat kereta bergerak seperti tertulis pada Peraturan Menteri Perhubungan Nomor: PM. 175 Tahun 2015 tentang “Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal Dengan Penggerak Sendiri” Pasal 16 ayat 1 menjelaskan persyaratan pintu masuk penumpang [3]. Pintu KRL tersusun oleh rangka (*frame*), lapisan luar (*skin*), kaca, dan material pengisi. Bagian pintu yang kosong biasanya diisi menggunakan komponen pengisi berupa struktur *sandwich honeycomb* [4]. Ketebalan dinding sel inti adalah variabel kritis yang mempengaruhi kekuatan *sandwich honeycomb* yang terkena beban tekanan lateral [5].

Terdapat permasalahan desain dari pintu KRL *Commuter Line* memiliki yang masih mendekati batas maksimal yang telah ditentukan. Sebagai material isian pintu *sandwich honeycomb board* memiliki volume terbesar dibandingkan komponen lainnya, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut. Peningkatan ketebalan dinding sel menyebabkan berat struktur juga meningkat [6]. Optimasi dari ketebalan dinding sel dilakukan untuk mengurangi berat dari inti *sandwich honeycomb board* yang berdampak kepada berat pintu. Terdapat keraguan terhadap pengurangan ketebalan dinding sel yang akan berdampak menurunnya sifat mekanik inti *sandwich honeycomb*.

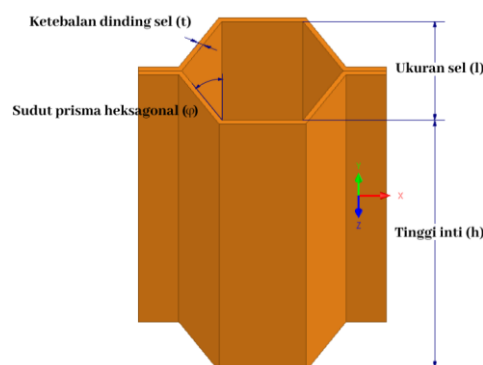
Diperlukan material dengan sifat mekanik lebih baik dari material *polypropylene* untuk tetap mempertahankan sifat mekanik *sandwich honeycomb* dalam perannya membantu *frame* dalam menopang kekuatan dan kekakuan pintu. Material merupakan salah satu parameter penting yang menentukan sifat mekanis struktur inti *sandwich honeycomb* [7]. Pintu kereta listrik di Korea saat ini menggunakan material *aluminium alloy 5052* pada inti struktur *sandwich honeycomb* [8].

Optimasi dilakukan menggunakan metode elemen hingga. Membandingkan 6 variasi model dengan variasi ketebalan dinding sel 0,0508 mm, 0,0635 mm, dan 0,0762 menggunakan material *polypropylene* dan *aluminium alloy 5052-H34*. Standar pengujian kelayakan sifat mekanik pintu KRL merujuk pada *Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10(R))* tentang “*Entrance Door for Electric Car*” dan Peraturan Menteri Perhubungan Nomor: PM. 175 Tahun 2015 tentang “Standar Spesifikasi Teknis Kereta Kecepatan Normal Dengan Penggerak Sendiri” [9,10]. *Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10(R))* menjelaskan metode pengujian sifat mekanik pintu kereta listrik dengan pembebanan terpusat dan batas nilai defleksi yang diizinkan [9]. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor: PM. 175 Tahun 2015 menjelaskan mengenai tegangan tarik maupun tegangan geser pada beban maksimum terhadap titik kritis konstruksi badan kereta yang diizinkan adalah 75% dari *yield strength* material yang digunakan atau tegangan izin atau setara dengan nilai *safety factor* minimum 1,33[10].

2. Material dan metode penelitian

2.1. Material Sandwich Honeycomb

Sandwich honeycomb merupakan material pengisi pada pintu KRL *Commuter Line* [4]. Konstruksi *sandwich* dipilih karena memiliki perbandingan rasio kekuatan dan berat yang tinggi [11]. Struktur *sandwich* adalah struktur ringan yang tersusun dari inti heksagonal ditempatkan antara dua *skin* yang direkatkan [12]. Setiap komponen dengan sendirinya relatif lemah dan fleksibel tetapi ketika bekerja dalam kombinasi yang sangat kaku, kuat, dan struktur ringan [13]. Komponen inti adalah komponen terpenting dalam *sandwich* karena inti harus kaku agar jarak antar permukaan tetap terjaga dan kekakuan inti harus mampu menahan geseran agar tidak terjadi gesekan antar permukaan [14,15].



Gambar 1. Parameter Sel Inti *Honeycomb Hexagonal*.

Struktur *honeycomb* memiliki konfigurasi yang berkaitan dengan sifat kegagalan dan dampak yang berbeda ini dipengaruhi oleh parameter struktural seperti ukuran sel, ketebalan dinding sel, tinggi inti dan sudut prisma heksagonal ketebalan dinding sel inti *sandwich honeycomb* merupakan variabel kritis yang mempengaruhi kekuatan hancur panel *sandwich* yang dikenai beban tekanan lateral [5,6,16]. Inti *sandwich honeycomb* pada pintu KRL *Commuter Line*

menggunakan inti dengan ketinggian 20 mm dan berbentuk heksagonal. Optimasi dilakukan dengan membanding beberapa model inovasi dengan model pintu yang telah ada. *Sandwich honeycomb* sebagai isian pintu kereta menggunakan material *polypropylene*, inti *honeycomb* memiliki sifat mekanik meningkat dengan bertambahnya ketebalan sel inti dan lapisan perantara [16]. *Polypropylene* (PP) adalah polimer yang dibuat secara katalitik dari propilena dengan massa jenis sebesar 900 kg/m³. *Aluminium alloy (AA) 5052-H4* dipilih sebagai material pembanding dengan massa jenis sebesar 2680 kg/m³. *Aluminium alloy* dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, keuletan yang tinggi, dan ketahanan terhadap korosi yang tinggi [17]. Data properties setiap variasi inovasi model pintu tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Data parameter setiap variasi model pintu

Variasi Inti	Ukuran Sel (<i>a</i>)	Ketebalan Dinding Sel (<i>t_c</i>)	Material
Model Default	8 mm	0,25 mm	<i>Polypropylene</i>
Model 1	5,4993 mm	0,0508 mm	<i>Polypropylene</i>
Model 2	5,4993 mm	0,0635 mm	<i>Polypropylene</i>
Model 3	5,4993 mm	0,0762 mm	<i>Polypropylene</i>
Model 4	5,4993 mm	0,0508 mm	<i>AA 5052-H34</i>
Model 5	5,4993 mm	0,0635 mm	<i>AA 5052-H34</i>
Model 6	5,4993 mm	0,0762 mm	<i>AA 5052-H34</i>

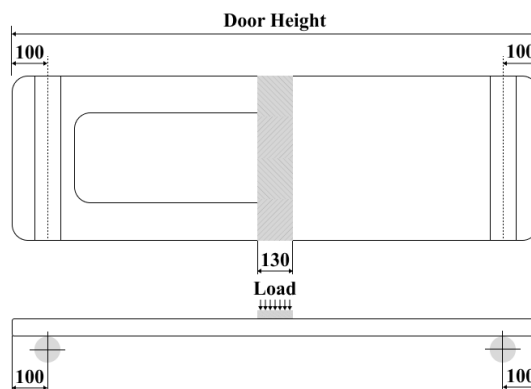
Proses simulasi metode elemen hingga *sandwich honeycomb* dilakukan dengan *equivalent model* dengan inti solid menggunakan *orthotropic material* [18]. Data properties inti *sandwich honeycomb* dengan beberapa variasi tersaji pada Tabel 2.

Tabel 2. Properti Material Orthotropic

Item	Default	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5	Model 6
E_Z	0,732	0,004	0,007	0,012	0,128	0,250	0,432
E_X	0,889	0,004	0,009	0,015	0,144	0,281	0,485
E_Y	166,667	28,444	35,556	42,667	999,822	1249,778	1499,733
G_{XZ}	0,182	0,001	0,002	0,003	0,032	0,062	0,108
G_{XY}	22,007	3,756	4,695	5,634	140,955	176,193	211,432
G_{YZ}	33,011	5,634	7,042	8,451	211,432	264,290	317,148
ν_{XZ}	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900	0,900
ν_{XY}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
ν_{YZ}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

2.2. Persyaratan Kekuatan Pintu

Untuk memastikan keandalan pintu yang tinggi pintu harus memiliki kekakuan yang memadai [19]. Standar pengujian pintu mengacu pada *Korean Railway Standard (KRS CB 0001-10(R))*. Pengujian sifat mekanis pintu dilakukan untuk memastikan kelayakan produk. Pengujian tekuk tiga titik dengan dua penopang berbentuk silindris dengan diameter 50 mm pada bawah pintu dengan jarak 100 mm dari setiap ujung pintu dan beban diletakan pada area tengah pintu. Bentuk uji tekuk tiga titik pintu dengan standar *KRS CB 0001-10(R)* dapat dilihat pada gambar 4 [9]. Pembebanan dilakukan sebanyak dua kali dengan beban pertama sebesar 588,4 N dan pembebanan kedua sebesar 980,67 N [9].

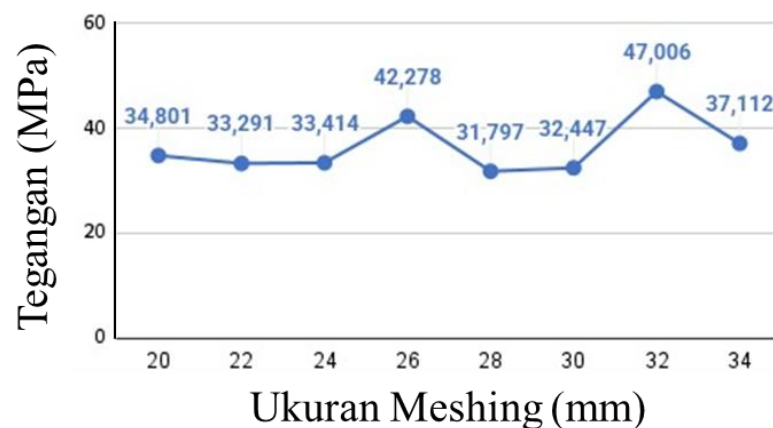
Gambar 2. Uji Tekuk Tiga Titik Korean Railway Standards (*KRS CB 0001-10(R)*)

Batas nilai keberterimaan perilaku pintu mengacu pada *Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10(R))* sebagai standar batas nilai defleksi maksimal pada kedua pembebanan. Nilai defleksi maksimal yang diizinkan pada *Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10(R))* 3 mm saat pembebanan pertama sebesar 588,4 N dan 5 mm pada pembebanan kedua sebesar 980,67 N [9]. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor: PM. 175 Tahun 2015 sebagai standar keberterimaan dari nilai tegangan maksimal dan nilai *safety factor* dengan nilai izin yaitu 75% dari nilai *yield strength* material atau setara dengan nilai minimum *safety factor* sebesar 1,33 [10, 20].

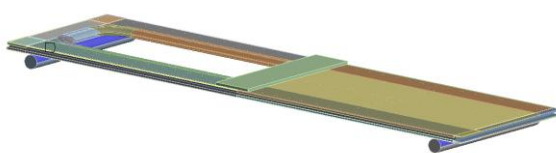
2.3. Metode Elemen Hingga

Simulasi uji tekuk tiga titik pintu KRL *Commuter Line* dengan metode elemen hingga. Metode elemen hingga umum digunakan memprediksi perilaku fisik sistem dan struktur dengan cara membagi struktur menjadi beberapa elemen mendeskripsikan perilaku setiap elemen dengan cara yang sederhana [21,22]. Pengujian dilakukan dengan 6 model baru dan model default yang saat ini digunakan. Pemodelan dan pendefinisian material telah dilakukan kemudian dilanjutkan pada tahap *preprocessing*. Dimulai dengan mendefinisikan kontak setiap komponen dengan sambungan dianggap sempurna. Kontak komponen pintu dan penyangga dari uji tekuk tiga titik didefinisikan memiliki konstanta gesek sebesar 0,2 [23].

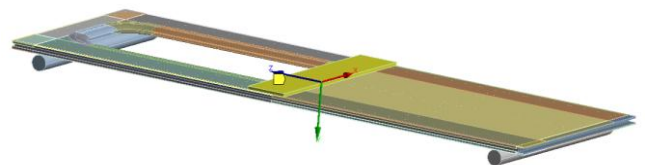
Untuk melakukan simulasi menggunakan metode elemen hingga diperlukan meshing untuk membagi komponen menjadi lebih kecil dan dilakukan kalkulasi secara numerik dengan bantuan *software* metode elemen hingga. Diperlukan uji konvergensi dan cek kualitas mesh untuk memastikan hasil simulasi akurat dan sesuai [22,24,25]. Ketika sudah menemukan hasil perbandingan meshing yang nilainya kurang dari 5% maka meshing tersebut digunakan sebagai acuan untuk *running software* elemen hingga sebagai dasar analisis kekuatan struktur [26]. Grafik perubahan nilai tegangan dan defleksi tersaji pada gambar 4. Dengan ukuran *mesh* yang dipilih adalah ukuran 24 mm dengan nilai kualitas *skewness* 0,255 dan nilai kualitas *jacobian ratio* 0,892. Kualitas *mesh* dalam rentang ukuran yang direkomendasikan.



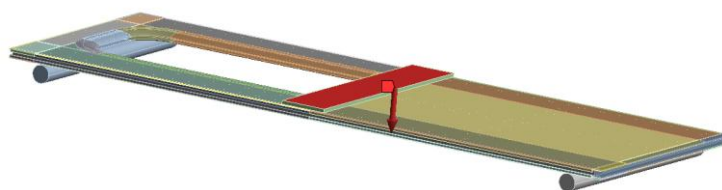
Gambar 3. Grafik Perbandingan Tegangan Maksimum



Gambar 4. Letak *Fix Support*



Gambar 5. Letak *Displacement Support*



Gambar 6. Letak Pembebanan

Batas kondisi yang diberikan berupa titik tumpu dan beban. Terdapat dua jenis tumpuan atau *support* yang digunakan berupa *fix support* dan *displacement support*. Peletakan *fix support* berada pada tumpuan silindris di bawah pintu terlihat pada gambar 5. *Displacement support* diberikan pada area beban atau balok di atas tengah pintu terlihat pada gambar 6. Beban yang disimulasikan mengacu pada *Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10(R))* yaitu sebanyak dua kali yaitu 588,4 N dan 980,67 N yang dilakukan pada balok yang berada di tengah pintu terlihat pada gambar 7[9]. Jenis pembebanan yang digunakan adalah jenis *directional force*. Dari hasil simulasi metode elemen hingga ini nantinya diperoleh data berupa nilai defleksi dan tegangan dalam bentuk tabel, grafik, plot, dan animasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi pengujian kekuatan mekanik pintu KRL *Commuter Line* menghasilkan nilai defleksi dan tegangan dari komputasi persebaran beban terhadap setiap node pada elemennya. Dari proses *solving* diperoleh hasil berupa nilai maksimal dari defleksi dan tegangan selama pembebanan statis. Nilai defleksi maksimal merupakan syarat keberterimaan terhadap standar *KRS CB 0001-10(R)*. Rekapitulasi seluruh hasil simulasi berupa nilai defleksi dan tegangan diolah tersaji pada tabel 3. Hasil dilakukan *plotting* berdasarkan variasi model tersaji pada tabel 3.

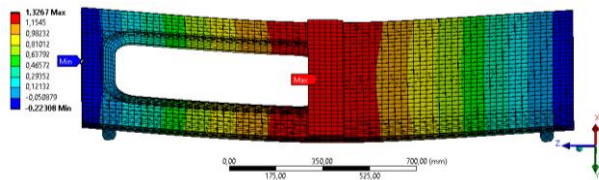
Tabel 3. Perbandingan Nilai Defleksi dan Tegangan dari Seluruh Model

Model	Berat (kg)	Defleksi Maksimal (mm)		Tegangan Maksimal (Mpa)		Safety Factor (Min.)
		588,4 N	980,67 N	588,4 N	980,67 N	
Default	32,448	1,283	2,137	19,609	32,660	6,337
Model 1	31,816	1,327	2,209	21,018	35,006	5,913
Model 2	31,816	1,324	2,205	20,959	34,898	5,931
Model 3	31,850	1,321	2,200	20,416	33,989	6,090
Model 4	31,870	1,196	1,992	20,637	34,359	6,024
Model 5	32,183	1,186	1,976	20,787	34,610	5,980
Model 6	32,243	1,179	1,963	20,896	34,802	5,947

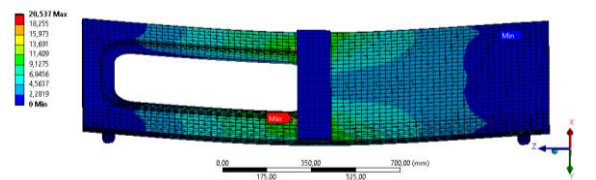
Hasil perhitungan berat dari ketujuh model pintu dengan variasi inti *sandwich honeycomb* diperoleh berat pintu yang paling ringan adalah pintu model 1 yaitu pintu menggunakan inti *sandwich honeycomb* berukuran sel 5,4993 mm, ketebalan dinding sel 0,0508 mm dengan material *polypropylene*. Dengan berat total 31,816 kg dengan pengurangan berat 1,95% dari pintu model *default*. Pintu dengan penurunan berat terkecil dari model *default* adalah model 6 yaitu pintu menggunakan inti *sandwich honeycomb* berukuran sel 5,4993 mm, ketebalan dinding sel 0,0762 mm dengan material *AA 5052-H34* yang memiliki berat 32,283 dengan penurunan berat sebesar 0,51%. Semakin bertambahnya ketebalan dinding sel akan semakin bertambah juga berat inti *sandwich honeycomb*.

Berdasarkan hasil simulasi pintu diperoleh nilai defleksi dan tegangan. Dari *Korean Railway Standards (KRS CB 0001-10(R))* menentukan batas defleksi pintu saat pembebanan 588,4 N adalah 3 mm dan saat pembebanan 980,67 N adalah 5 mm. Nilai defleksi terbesar dimiliki model 1 dengan nilai defleksi maksimum sebesar 1,327 mm dan saat pembebanan 588,4 N dan nilai defleksi maksimum sebesar 2,209 mm saat pembebanan 980,67 N. Nilai defleksi terkecil dimiliki pintu model 6 dengan nilai defleksi maksimum sebesar 1,179 mm dan saat pembebanan 588,4 N dan nilai defleksi maksimum sebesar 1,963 mm saat pembebanan 980,67 N. Sifat mekanis struktur *sandwich honeycomb* ditentukan dari sifat mekanis material yang digunakan. Pintu menggunakan inti *sandwich honeycomb* dengan material *AA 5052-H34* memiliki defleksi yang lebih kecil dibandingkan pintu dengan inti *sandwich honeycomb* menggunakan material *polypropylene*. Inti *sandwich honeycomb* memiliki sifat mekanik meningkat dengan bertambahnya ketebalan sel inti. Dapat dilihat semakin bertambahnya ketebalan dinding sel maka nilai defleksi dari hasil simulasi pintu semakin menurun.

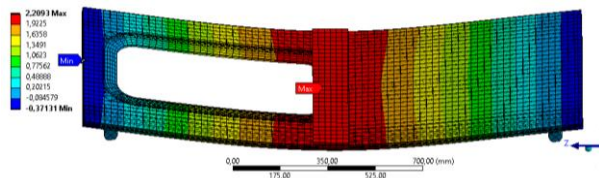
Batas izin nilai tegangan yaitu 75% dari *yield strength* material atau setara dengan nilai minimum *safety factor* sebesar 1,33 menurut Peraturan Kementerian Perhubungan PM No. 175 Tahun 2015. Pintu yang memiliki nilai tegangan maksimum terbesar dimiliki pintu model 6 dengan nilai tegangan maksimum maksimal 34,801 MPa saat pembebanan maksimum yaitu 980,67 N, tegangan terbesar terjadi pada komponen *sheet 1* dengan nilai *yield strength* 206,98 MPa. Dari tegangan maksimum maksimum dapat diperoleh nilai perbandingan tegangan maksimum terhadap *yield strength* material adalah 16,81% atau setara dengan nilai *safety factor* minimum yaitu 5,948. Pintu yang memiliki nilai tegangan maksimum terkecil dimiliki pintu model *default* dengan nilai tegangan maksimal 32,660 MPa saat pembebanan maksimum yaitu 980,67 N, tegangan terbesar terjadi pada komponen *sheet 2* dengan nilai *yield strength* 206,98 MPa. Dari tegangan maksimum maksimum dapat diperoleh nilai perbandingan tegangan terhadap *yield strength* material adalah 15,78% atau setara dengan nilai *safety factor* minimum yaitu 6,337.



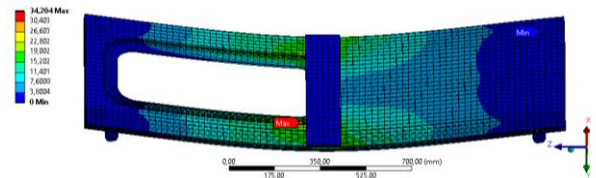
Gambar 7. Distribusi Defleksi Saat Pembebanan 588,4 N pada Pintu Model 1



Gambar 8. Distribusi Tegangan Saat Pembebanan 588,4 N pada Pintu Model 1

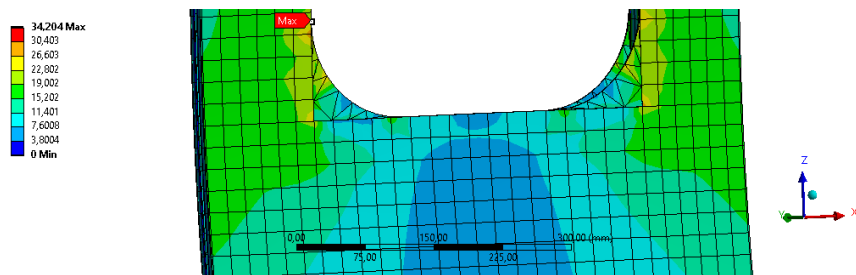


Gambar 9. Distribusi Defleksi Saat Pembebanan 980,67 N pada Pintu Model 1



Gambar 10. Distribusi Tegangan Saat Pembebanan 980,67 N pada Pintu Model 1

Berdasarkan perbandingan hasil pembebanan pada pintu KRL *Commuter Line* dengan menggunakan beberapa variasi inti *sandwich honeycomb* dengan perbedaan ketebalan dinding sel dan material inti *sandwich honeycomb*. Diperoleh variasi teroptimal adalah model 1 yaitu pintu menggunakan inti *sandwich honeycomb* dengan ukuran sel 5,4993 mm, ketebalan dinding sel 0,0508 mm dengan material *polypropylene* dengan penghematan berat 1.95% dari model *default*. Diperoleh juga pengaruh ketebalan dinding sel dan sifat mekanis material terhadap berat serta kekuatan inti *sandwich honeycomb* yang berdampak terhadap sifat mekanis struktur pintu.



Gambar 11. Letak Tegangan Maksimum pada Pintu Model 1

Pada ketujuh simulasi beberapa model pintu dengan variasi ketebalan dinding sel dan material inti *sandwich honeycomb* diperoleh komponen dengan tegangan maksimum terbesar adalah komponen *sheeting* tepatnya pada area jendela. Komponen ini mengalami tegangan tertinggi karena menerima distribusi gaya secara vertikal karena letaknya di bawah area pembebanan. Area *sheeting* dengan tegangan terbesar juga dipengaruhi geometri dari *sheeting* yang tipis dengan lubang kaca pintu. Sehingga diperlukan penambahan komponen penyangga sebagai *support sheeting* pada area tersebut karena bagian tersebut tidak terisi oleh *sandwich honeycomb*.

4. Kesimpulan

Ketebalan dinding sel dan material inti *sandwich honeycomb* memiliki dampak terhadap kekuatan struktur pintu. Seiring meningkatnya ketebalan dinding sel dan sifat mekanis material yang digunakan pada inti *sandwich honeycomb* meningkat juga kekakuan dan kekuatan struktur *honeycomb*-nya yang berpengaruh terhadap struktur pintu. Pada penelitian optimasi ketebalan dinding sel dan material inti *sandwich honeycomb* pada pintu KRL *Commuter Line* dapat disimpulkan Model pintu dengan inti *sandwich honeycomb* teroptimal adalah model 1 dengan menggunakan inti *sandwich honeycomb* yang saat ini sudah digunakan dengan ukuran sel 3/8 inch, ketebalan dinding sel 0,002 inch, dan menggunakan material *polypropylene* memiliki berat total 31,816 kg dan penghematan berat sebesar 1,95 %. Dengan defleksi yang masih dalam syarat keberterimaan standar *KRS CB 0001-10(R)* untuk defleksi dan Peraturan Kementerian Perhubungan PM 175 Tahun 2015. Dengan nilai defleksi maksimum sebesar 1,327 mm dan *von mises* tegangan sebesar 21,018 MPa saat pembebanan 588,4 N dan nilai defleksi maksimum sebesar 2,209 mm dan tegangan sebesar 35,006 MPa saat pembebanan 980,67 N. Model 1 memiliki nilai tegangan maksimal 35,006 MPa pada komponen *sheet 2* dengan nilai *yield strength* 206,98 MPa. Sehingga model 1 masih dalam batas standar dengan nilai perbandingan tegangan 16,91% jauh dari batas nilai perbandingan tegangan 75% (PM 175 Tahun 2015). Komponen *sheeting* mengalami tegangan terbesar dibanding dari komponen lain tepatnya pada area lubang kaca. Kemungkinan besar disebabkan letak yang berada dibawah tempat pembebanan, geometri yang tipis dengan lubang, dan area tersebut tidak terisi dengan *sandwich honeycomb*.

Daftar Pustaka

- [1] CNN Indonesia. INKA Buka Suara soal Pesanan Kereta KCI [Internet]Cable News Network, Inc.; 2023 Merch [cited 2024 Jan 16]. Available from: <https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20230303131046-92-920327/inka-buka-suara-soal-pesanan-kereta-kci>
- [2] Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015. Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor : PM 175 Tahun 2015. Jakarta.
- [3] Ibrahim B, Bagus SA, Martinus PY. Sistem Tata Letak Akomodasi Penumpang Pada Interior Kereta Api Ekonomi Jarak Menengah. *Jurnal Sositologi*. 2015 14(2). 179–200.
- [4] Pflug J, Xinyu F, Vangrimde B, Verpoest I, Bratfisch P, Vandepitte,D. Development of a sandwich material with polypropylene/natural fibre skins and paper honeycomb core. In *Proceedings of 10th European Conference on Composite Materials (ECCM-10)*. 2002. 331.
- [5] Rao KK, Rao KJ, Sarwade AG, Chandra, MS. Strength Analysis on Honeycomb Sandwich Panels of different Materials. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2012. 2(3). 365–374.
- [6] Thomas T, Tiwari G. Crushing behavior of honeycomb structure: a review. *International Journal of Crashworthiness*. 2019. 24(5). 555–579.
- [7] Miranda A, Leite M, Reis L, Copin E, Vaz M F, Deus AM. Evaluation of the influence of design in the mechanical properties of honeycomb cores used in composite panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2021. 235(6). 1325–1340.
- [8] Lim JY. Structural Stiffness Analysis on Doors having Pyramidal Truss Cores in an Urban Transit Vehicle. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 2017. 18(6). 697-702.
- [9] KRS CB 0001, 2010. Korean Railway Standards (KRS CB 001-10(R)): Tentang “Entrance Door for Electric Car”. Korea.
- [10] Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2015. Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor : PM 175 Tahun 2015. Jakarta.
- [11] Chandrashekhar A, Shaik HS, Ranjan MS, Srivastava T, Pavan KML. Static Structural Analysis of Hybrid Honeycomb Structures Using FEA. In *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. 26. PP. 363–375. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- [12] Marsono M, Ali A, Luwis N. Karakteristik Mekanik Panel Honeycomb Sandwich Berbahan Komposit Fibreglass dengan Dimensi Cell-Pitch 40mm dan Cell-Height 30mm. *Jurnal Rekayasa Hijau*. 2019. 3(2).
- [13] Kumar JS, Kalaichelvan K. Taguchi-Grey Multi-Response Optimization on Structural Parameters of Honeycomb Core Sandwich Structure for Low Velocity Impact Test. 2018. *Silicon*, 10(3). 879–889.
- [14] Lubis S, Siregar AM, Siregar I. Study of Statically Tested Honeycomb Structure. *International Journal of Economic, Technology and Social Sciences (Injects)*. 2021. 2(1). 1-12.
- [15] Onyibo EC, Safaei B. Application of finite element analysis to honeycomb sandwich structures: a review. *Reports in Mechanical Engineering*. 2022. 3(1) 192–209.
- [16] Arbaoui J, Moustabchir H, Pruncu CI, Schmitt Y. Modeling and experimental analysis of polypropylene honeycomb multi-layer sandwich composites under four-point bending. *Journal of Sandwich Structures and Materials*. 2018. 20(4). 493–511.
- [17] Georgantzia E, Gkantou M, Kamaris GS. Aluminium alloys as structural material: A review of research. *Engineering Structures*. Elsevier Ltd. 2021.
- [18] Steenackers G, Peeters J, Ribbens, B, Vuye C. Development of an Equivalent Composite Honeycomb Model: A Finite Element Study. *Applied Composite Materials*. 2016. 23(6). 1177–1194
- [19] Yuan X. Research on Dynamics Stiffness of Honeycomb Sandwich Structure Door. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 2133(1). IOP Publishing.
- [20] Mott RL, Vavrek EM, Wang J. *Machine Elements in Mechanical Design* 6th Edition. Pearson Education, Inc. 2005. pp. 365–367
- [21] Fitria N.S., Agus S., WidaY.R., Josia A.P., Muhammad A.M.. Pengaruh Variasi Kecepatan Pemakanan (Feed Rate) terhadap Gaya Potong Proses Gurdi dengan Material Aluminium. *ROTASI*, Vol. 25 No. 1 (Januari 2023) Hal. 1-7
- [22] Agus S., Hanum A., Muhamad F.S., Agus C.A., Muizuddin A. Hubungan Parameter Pemесinan terhadap Gaya Potong, Temperatur, dan Power pada Proses Bubut Inconel 718. *ROTASI*, Vol. 24 No. 3 (Juli 2022) Hal. 43-49
- [23] Xia F, Durandet Y, Tan PJ, Ruan D. Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores. *Thin-Walled Structures*. 2022. 179.
- [24] Aneta B. Quality Evaluation of Finite Element Models with Applications on Concrete Structures. MS thesis. *České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum*. 2020.
- [25] Kristiawan T, Setiyawan T, Yanuar P. Analisa Penggunaan Support Frame Lama Pada Desain Baru Screw Conveyor Machine Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Mesin Nusantara*. 2023. 6(1).
- [26] Rosid, Rahmat, Mardi S, Benedicta DA. Desain Dan Analisis Kekuatan Struktur Kontruksi Kapal Patroli 13 Meter Menggunakan Finite Element Method (FEM). *Proceedings Conference on Marine Engineering and its Application*. 2023. 6(1).