

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

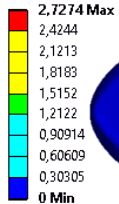
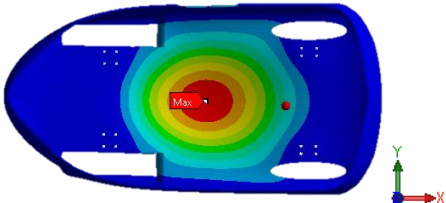
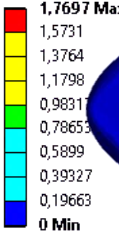
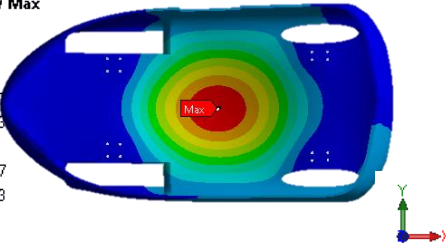
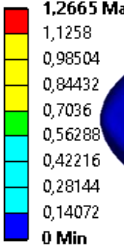
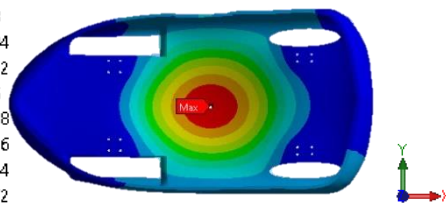
4.1 Analisis Total Deformasi Chassis

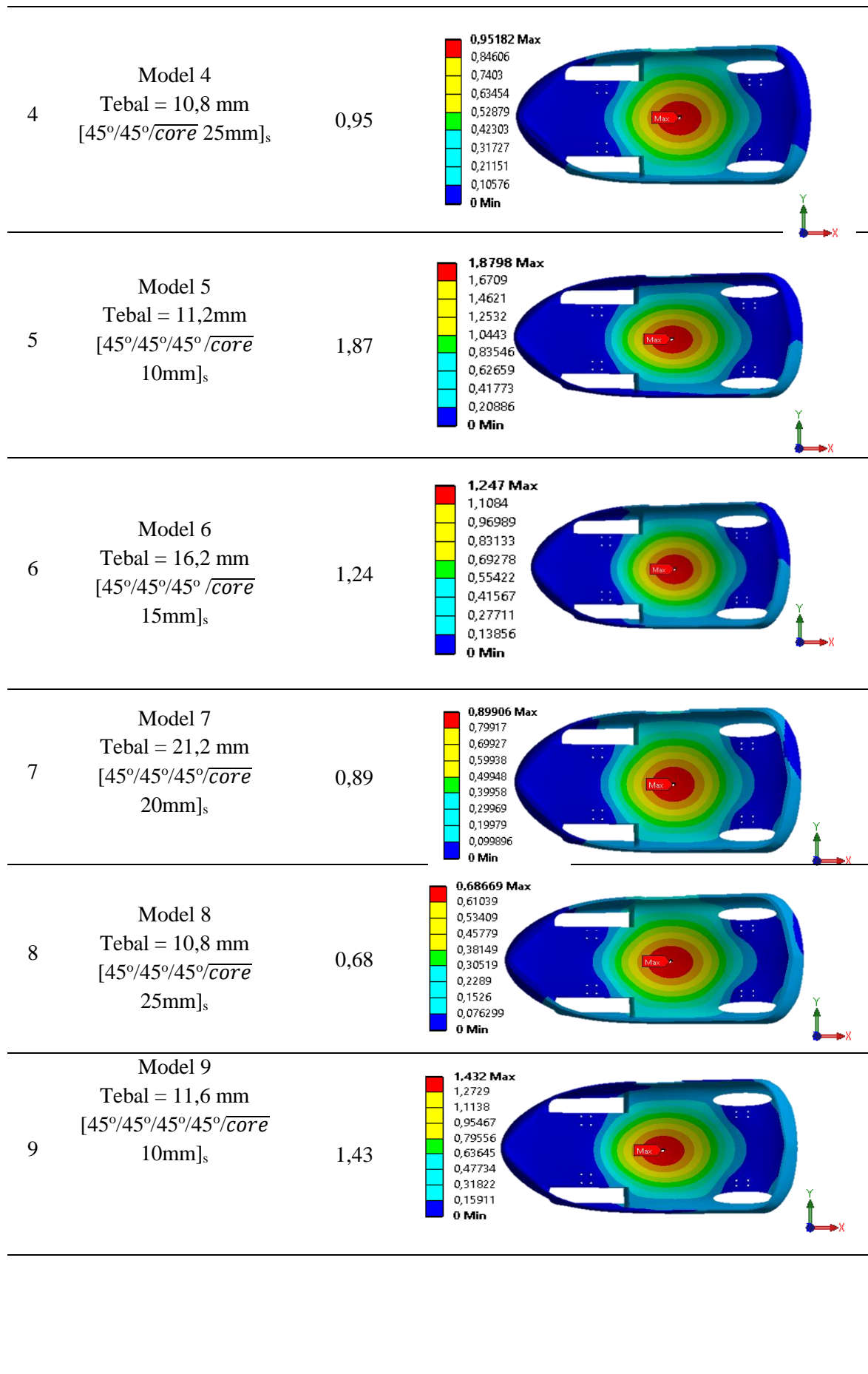
4.1.1 Analisis Total Deformasi Pada Variasi Tebal Skin dan Tebal Honeycomb Core Pengujian Vertical Bending

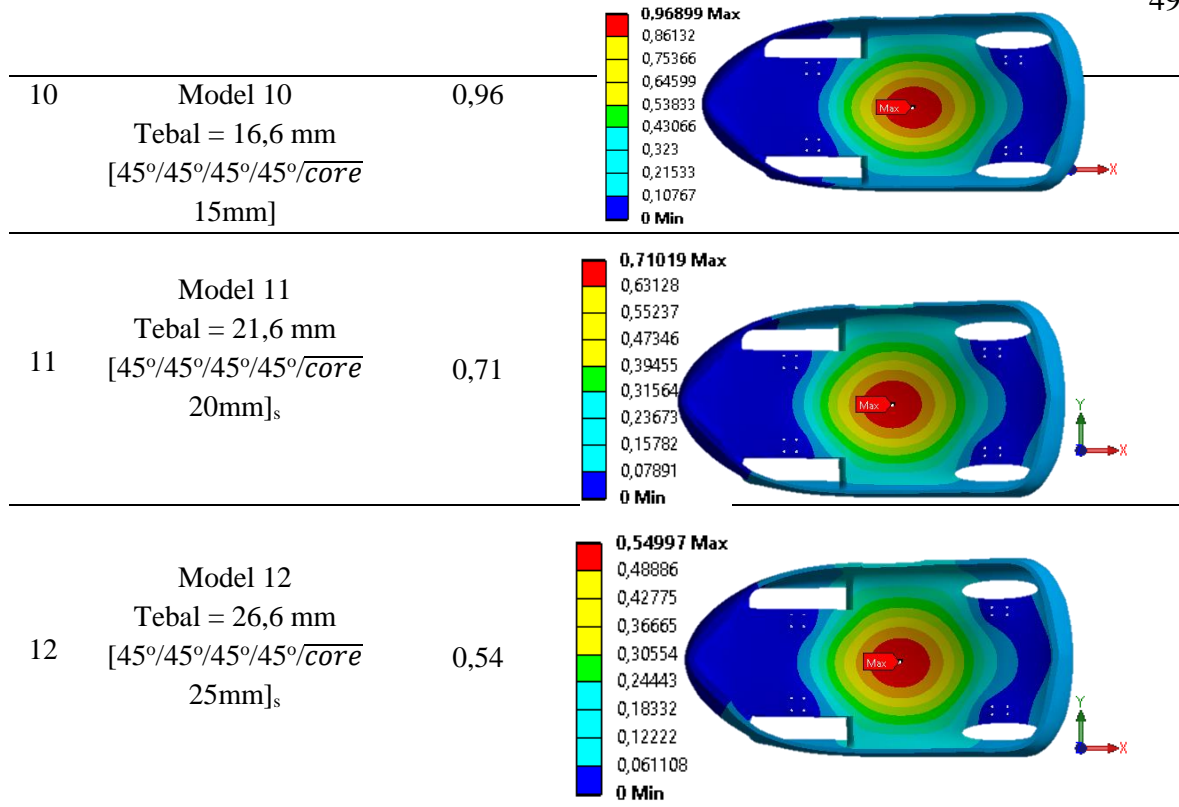
Pengujian *vertical bending* dilakukan pada 12 model chassis dengan variasi tebal *skin* dan tebal *honeycomb core*. Peletakan sebaran deformasi tiap model kurang lebih sama tiap model, yaitu deformasi maksimum tiap model tersebar didaerah permukaan yang terkena beban *vertical* dari berat *driver*. Total deformasi maksimal tiap model berada pada peletakan beban *driver*. Deformasi tidak terlihat tersebar ke bagian atas struktur mobil, terlihat berwarna biru membuktikan deformasi yang terjadi sangatlah kecil. Sebaran total deformasi tiap model ditampilkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1

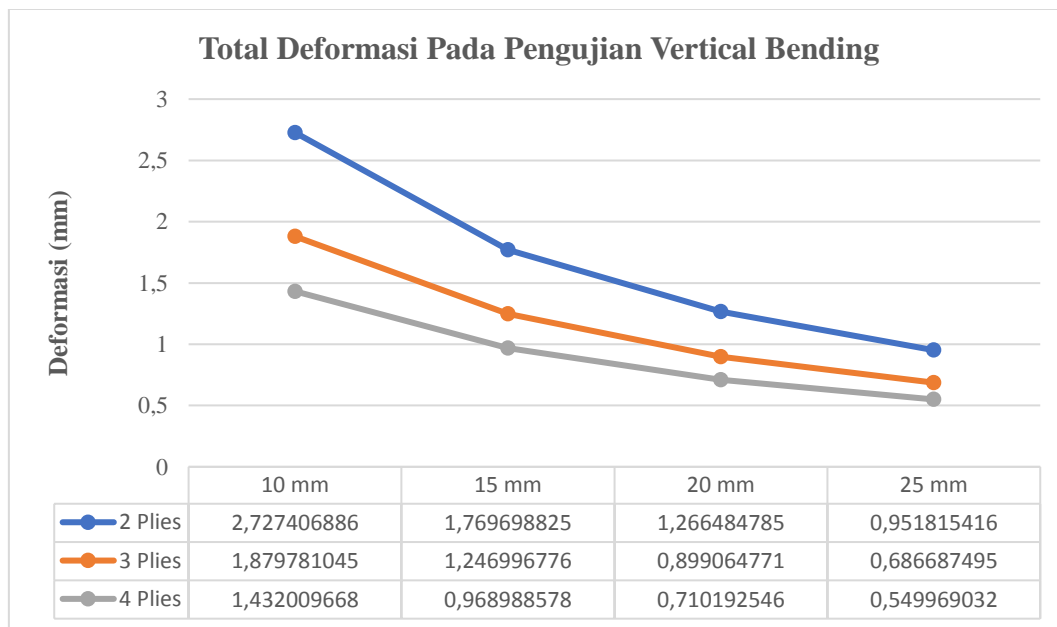
Total Deformasi Variasi Tebal *Skin* dan Tebal *Honeycomb Core* pada Pengujian *Vertical Bending*

No	Chassis	Deformasi (mm)		Visual	Sumbu Kordinat
		Maksimum	Legend		
1	Model 1 Tebal = 10,8 mm [45°/45°/core 10mm] _s	2,75			
2	Model 2 Tebal = 15,8 mm [45°/45°/core 15mm] _s	1,76			
3	Model 3 Tebal = 20,8 mm [45°/45°/core 20mm] _s	1,26			





Pengujian *vertical bending* dilakukan untuk mengetahui lendutan atau defleksi pada chassis saat diberi beban driver dan seluruh komponen. Hal ini juga terjadi ketika kendaraan mengalami akselerasi atau deselerasi secara tiba-tiba. Lendutan atau defleksi dapat dilihat melalui total deformasi.



Gambar 4.1 Grafik perbandingan total deformasi pengujian *vertical bending*

Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan total deformasi tiap model pada pembebanan *vertical bending*. Nilai deformasi tertinggi dari semua model terjadi pada model ke-1 sebesar 2,72 mm dan nilai deformasi terendah dari semua terjadi pada model ke-12 sebesar 0,54 mm. Ini dikarenakan pada model ke-1 memiliki struktur *sandwich* paling tipis dari semua model.

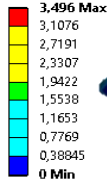


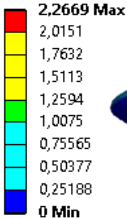


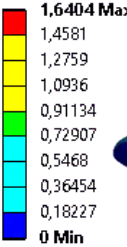
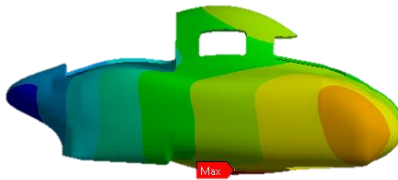

Sedangkan model ke-12 memiliki struktur paling tebal dari semua model. Semakin tebal *core* dan *skin* pada struktur *sandwich* akan meningkat kekakuan pada *sandwich* semakin besar, sehingga nilai deformasi yang dialami *chassis* semakin kecil.

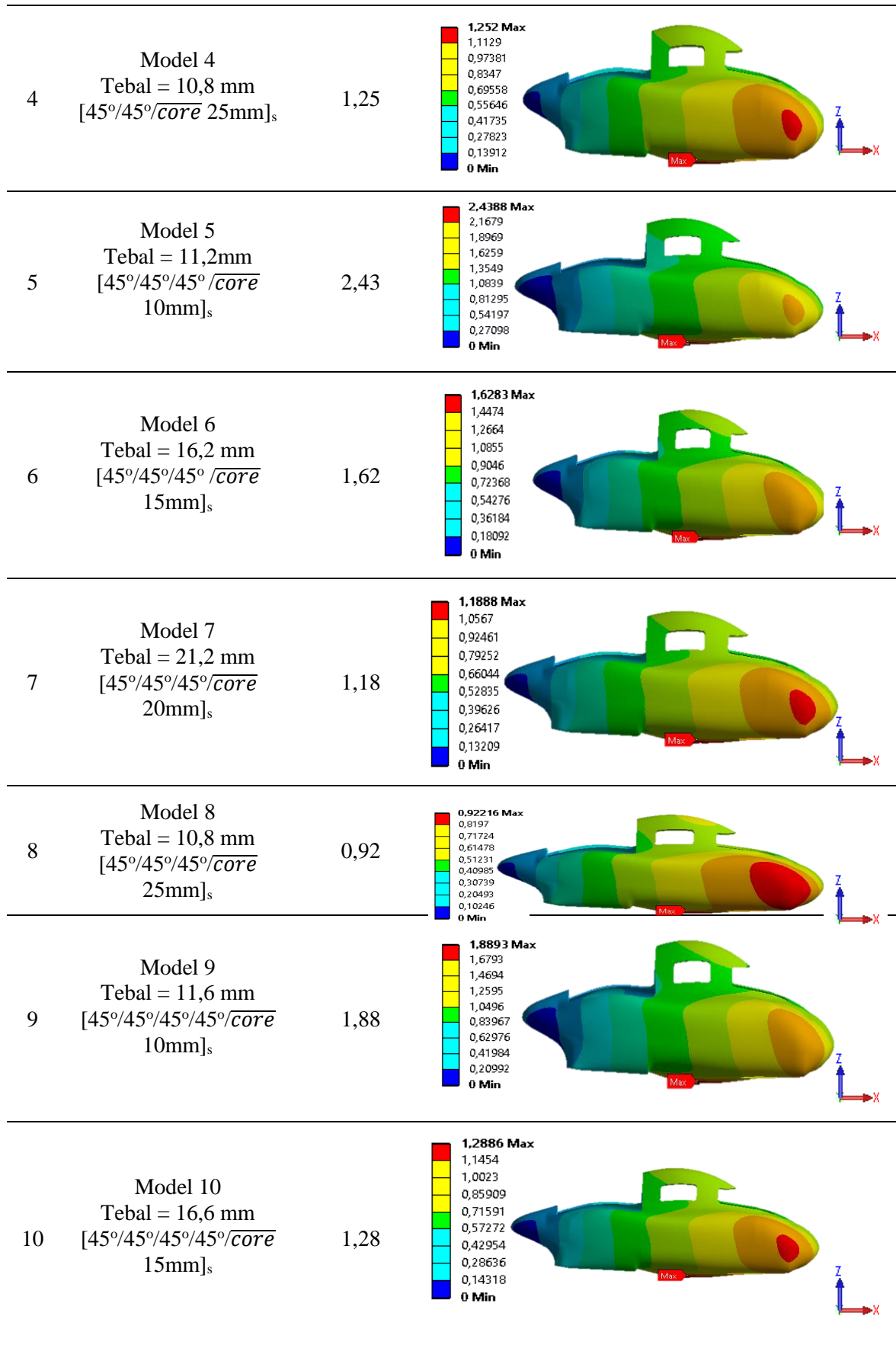
4.1.2 Analisis Total Deformasi Pada Variasi Tebal *Skin* dan Tebal *Honeycomb Core* Pengujian Torsional

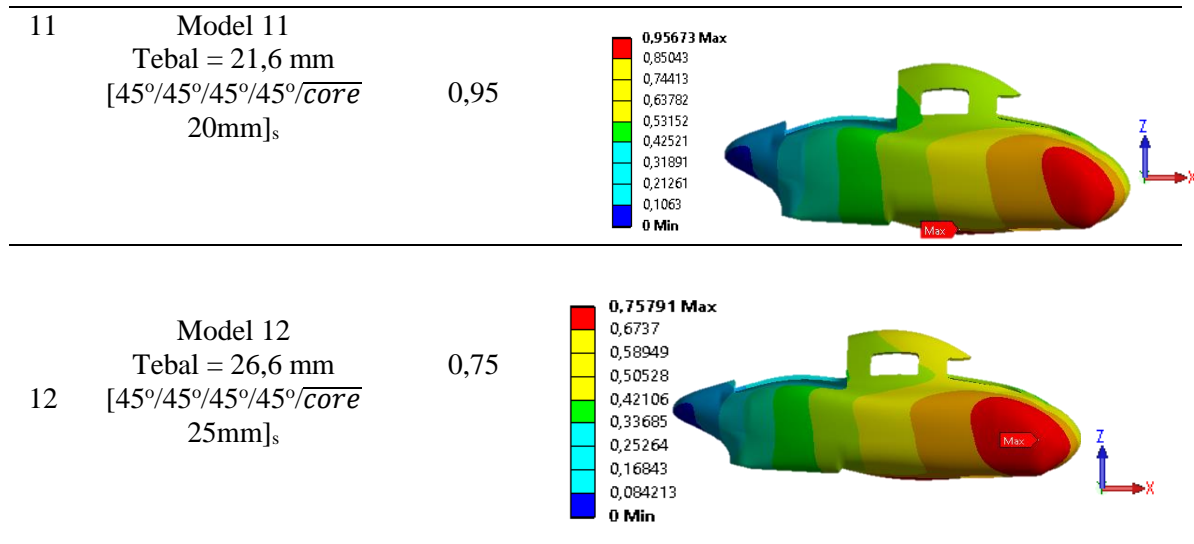
Pengujian Torsional dilakukan pada 12 model *chassis* dengan variasi tebal *Skin* dan tebal *honeycomb core*. Peletakan sebaran deformasi tiap model kurang lebih sama, yaitu deformasi maksimum tiap model tersebar didaerah permukaan yang terkena beban *vertical* dari berat *driver*. deformasi maksimum tiap model berada di peletakan beban *driver*. Deformasi akibat beban torsional tersebar hingga struktus atas mobil, tetapi nilainya tidak terlalu besar. Sebaran deformasi tiap model ditampilkan pada Tabel 4.2

Tabel 4.2

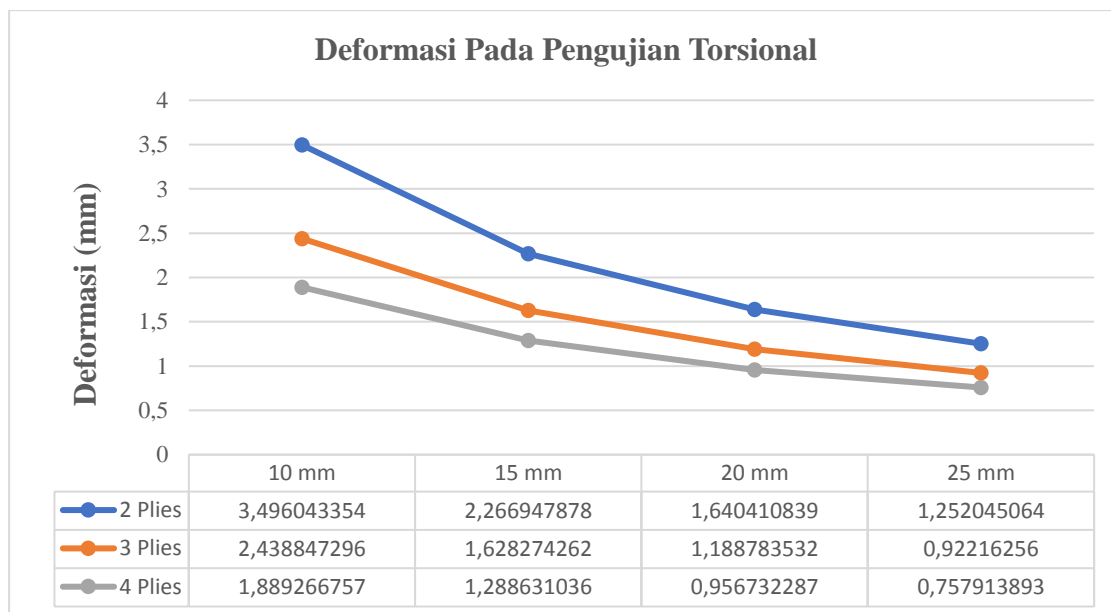
Total Deformasi Variasi Tebal *Skin* dan Tebal *Honeycomb Core* pada Pengujian Torsional

No	Chassis	Deformasi (mm)		Visual	Sumbu Koordinat
		Maksimum	Legend		
1	Model 1 Tebal = 10,8 mm [45°/45°/core 10mm] _s	3,49			
2	Model 2 Tebal = 15,8 mm [45°/45°/core 15mm] _s	2,26			
3	Model 3 Tebal = 20,8 mm [45°/45°/core 20mm] _s	1,64			





Pengujian torsional dilakukan untuk mengetahui kekakuan *chassis* untuk menahan kecenderungan terpuntir saat kendaraan berjalan pada kondisi jalan yang tidak rata.



Gambar 4.2 Grafik perbandingan total deformasi pada pengujian torsional

Grafik pada Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan total deformasi tiap model pada pembebanan torsional. Nilai deformasi tertinggi dari semua model terjadi pada model ke-1 sebesar 3,49 mm dan nilai deformasi terendah dari semua terjadi pada model ke-12 sebesar 0,75 mm. Ini dikarenakan pada model ke-1 memiliki struktur *sandwich* paling tipis dari semua model. Sedangkan model ke-12 memiliki struktur paling tebal dari semua model. Semakin tebal *core* dan *skin* pada struktur *sandwich* akan meningkat kekakuan pada *sandwich*, sehingga nilai deformasi yang dialami *chassis* semakin kecil. Hal ini sesuai dengan dasar teori. Pada rumus hubungan regangan terhadap matrik kekakuan [ABD] berikut.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^{\circ} \text{ xx} \\ \varepsilon^{\circ} \text{ yy} \\ \gamma^{\circ} \text{ xy} \end{bmatrix} = [A^{-1}] \begin{bmatrix} N \text{ xx} \\ N \text{ yy} \\ N \text{ xy} \end{bmatrix}. \quad (4-1)$$

$$\begin{bmatrix} k \text{ xx} \\ k \text{ yy} \\ k \text{ xy} \end{bmatrix} = [D^{-1}] \begin{bmatrix} M \text{ xx} \\ M \text{ yy} \\ M \text{ xy} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

Maka regangan didapatkan

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \text{ xx} \\ \varepsilon \text{ yy} \\ \gamma \text{ xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^{\circ} \text{ xx} \\ \varepsilon^{\circ} \text{ yy} \\ \gamma^{\circ} \text{ xy} \end{bmatrix} + Z \begin{bmatrix} k \text{ xx} \\ k \text{ yy} \\ k \text{ xy} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

Dimana:

$\varepsilon^{\circ} \text{ xx}, \varepsilon^{\circ} \text{ yy}$ = Regangan normal pada *midplane*

$\gamma^{\circ} \text{ xy}$ = Regangan geser pada *midplane xy*.

$k \text{ xx}, k \text{ yy}$ = Kelengkungan *bending*

$k \text{ xy}$ = Kelengkungan puntir

$N \text{ xx}, N \text{ yy}$ = Gaya normal arah x dan y

$N \text{ xy}$ = Resultan gaya geser

$M \text{ xx}$ = Bending momen di plane YZ

$M \text{ yy}$ = Bending momen di plane XZ

$M \text{ xy}$ = Momen Torsi

Z = Kordinat titik terluar lamina dari *midplane*

Meningkatnya tebal *skin* dan *core* akan meningkatkan matrik kekakuan [A] dan [D], dimana [B] = 0 pada *laminata balance* simetri. meningkatnya matrik kekakuan [A] akan menurunkan regangan normal $\varepsilon^{\circ} \text{ xx}, \varepsilon^{\circ} \text{ yy}$ dan regangan geser $\gamma^{\circ} \text{ xy}$ pada *midplane*. Sedangkan meningkatnya matrik kekakuan [D] akan menurunkan kelengkungan bending $k \text{ xx}, k \text{ yy}$ dan puntir $k \text{ xy}$. Dengan mengasumsikan nilai gaya normal (N_{xx} dan N_{yy}), resultan gaya geser N_{xy} , momen bending (M_{xx} dan M_{yy}) dan momen torsi (M_{xy}) konstan. Nilai regangan akan menurun seiring meningkatnya matrik kekakuan [A] dan [D]. Hal ini akan mengakibatkan tegangan yang terjadi pada *laminata sandwich* cenderung menurun.

Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan regangan per *ply* menggunakan perhitungan manual.

Regangan Per Ply terhadap Ketebalan Core

Tabel 4.3

Regangan Per Ply Model 1 [45/45/core 10mm]s

Lapisan	Z (mm)	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	γ_{xy}
Ply 1	-5,4	1,35702E-05	1,35702E-05	523,814E-05
	-5,2	1,36956E-05	1,36956E-05	523,841E-05
Ply 2	-5,2	1,36956E-05	1,36956E-05	523,841E-05
	-5,0	1,38209E-05	1,38209E-05	523,869E-05
Core	-5,0	1,38209E-05	1,38209E-05	523,869E-05
	0	1,69554E-05	1,69554E-05	524,562E-05
	5	2,00898E-05	2,00898E-05	525,255E-05
Ply 3	5	2,00898E-05	2,00898E-05	525,255E-05
	5,2	2,02152E-05	2,02152E-05	525,283E-05
Ply 4	5,2	2,02152E-05	2,02152E-05	525,283E-05
	5,4	2,03406E-05	2,03406E-05	525,310E-05

Tabel 4.4

Regangan Per Ply Model 2 [45/45/core 15mm]s

Lapisan	Z (mm)	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	γ_{xy}
Ply 1	-7,9	1,19959E-05	1,19959E-05	2,65456E-05
	-7,7	1,21213E-05	1,21213E-05	2,68228E-05
Ply 2	-7,7	1,21213E-05	1,21213E-05	2,68228E-05
	-7,5	1,22466E-05	1,22466E-05	2,71E-05
Core	-7,5	1,22466E-05	1,22466E-05	2,71E-05
	0	1,69466E-05	1,69466E-05	3,74944E-05
	7,5	2,16466E-05	2,16466E-05	4,78889E-05
Ply 3	7,5	2,16466E-05	2,16466E-05	4,78889E-05
	7,7	2,17719E-05	2,17719E-05	4,81661E-05
Ply 4	7,7	2,17719E-05	2,17719E-05	4,81661E-05
	7,9	2,18972E-05	2,18972E-05	4,84432E-05

Hal ini di buktikan pada model 1 [45/45/core 10mm]s dan model 2 [45/45/core 15mm]s. Model 1 dan 2 memiliki ketebalan *skin* yang sama yaitu 4 *plies* dengan perbedaan tebal core 10mm dan 15mm. Dari hasil perhitungan dengan persamaan (4-3) didapatkan perbandingan regangan yang terjadi pada model 1 dan model 2 mengalami penurunan regangan tiap lapisnya. Pada model 1 [45/45/core 10mm]s dan model 2 [45/45/core 15mm]s penurunan yang signifikan terjadi pada regangan geser arah xy tiap lapisnya. Hal ini dikarenakan ketebalan core akan mempengaruhi kekakuan dari struktur *sandwich*, sehingga regangan yang terjadi cenderung menurun.

Regangan Per Ply Terhadap Ketebalan Skin

Tabel 4.5

Regangan Per Ply Model 1 [45/45/core 10 mm]s

Lapisan	Z (mm)	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	γ_{xy}
Ply 1	-5,4	1,35702E-05	1,35702E-05	523,814E-05
	-5,2	1,36956E-05	1,36956E-05	523,841E-05
Ply 2	-5,2	1,36956E-05	1,36956E-05	523,841E-05
	-5,0	1,38209E-05	1,38209E-05	523,869E-05
Core	-5,0	1,38209E-05	1,38209E-05	523,869E-05

Lapisan	Z (mm)	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	γ_{xy}
	0	1,69554E-05	1,69554E-05	524,562E-05
	5	2,00898E-05	2,00898E-05	525,255E-05
Ply 3	5	2,00898E-05	2,00898E-05	525,255E-05
	5,2	2,02152E-05	2,02152E-05	525,283E-05
Ply 4	5,2	2,02152E-05	2,02152E-05	525,283E-05
	5,4	2,03406E-05	2,03406E-05	525,310E-05

Tabel 4.6

Regangan Per Ply Model 5 [45/45/45/core 10 mm]s

Lapisan	Z (mm)	ϵ_{xx}	ϵ_{yy}	γ_{xy}
Ply 1	-5,6	8,99403E-06	8,99403E-06	1,98871E-05
	-5,4	9,07656E-06	9,07656E-06	2,00696E-05
Ply 2	-5,4	9,07656E-06	9,07656E-06	2,00696E-05
	-5,2	9,15909E-06	9,15909E-06	2,0252E-05
Ply 3	-5,2	9,15909E-06	9,15909E-06	2,0252E-05
	-5	9,24162E-06	9,24162E-06	2,04345E-05
Core	-5	9,24162E-06	9,24162E-06	2,04345E-05
	0	1,13049E-05	1,13049E-05	2,49957E-05
	5	1,33682E-05	1,33682E-05	2,9557E-05
Ply 4	5	1,33682E-05	1,33682E-05	2,9557E-05
	5,2	1,34507E-05	1,34507E-05	2,97394E-05
Ply 5	5,2	1,34507E-05	1,34507E-05	2,97394E-05
	5,4	1,35332E-05	1,35332E-05	2,99219E-05
Ply 6	5,4	1,35332E-05	1,35332E-05	2,99219E-05
	5,6	1,36158E-05	1,36158E-05	3,01043E-05

Hal ini di buktikan pada model 1 [45/45/core 10mm]s dan model 5 [45/45/45/core 10mm]s. Model 1 dan model 5 memiliki ketebalan *core* yang sama yaitu 10 mm dengan perbedaan ketebalan *skin*. Dari hasil perhitungan dengan persamaan (4-3) didapatkan perbandingan regangan pada model 1 dan model 5. Regangan arah x, y serta regangan geser xy mengalami kecenderungan menurun setelah penambahan skin. Hal ini dikarenakan ketebalan skin akan mempengaruhi kekakuan dari struktur *sandwich*, sehingga regangan yang terjadi cenderung menurun.

4.2 Analisis Distribusi Tegangan Pada Chassis

4.2.1 Analisis Tegangan Pada Variasi Tebal Skin dan Tebal *Honeycomb Core*

Pengujian *Vertical Bending*

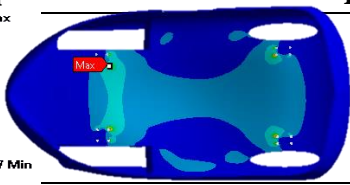

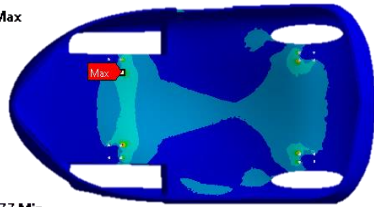

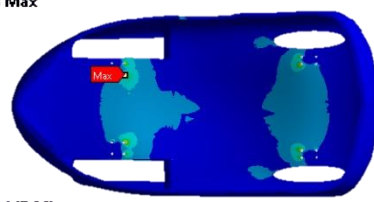

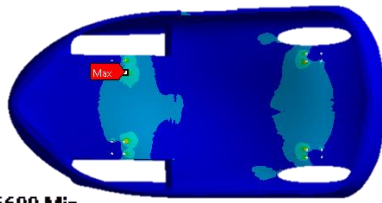

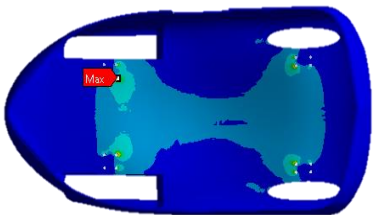

Uji *vertical bending* digunakan untuk mengetahui distribusi tegangan dan lendutan atau defleksi pada *chassis* saat kendaraan mengalami akselerasi atau deselerasi secara tiba-tiba dan saat diberikan beban seluruh komponen kendaraan.

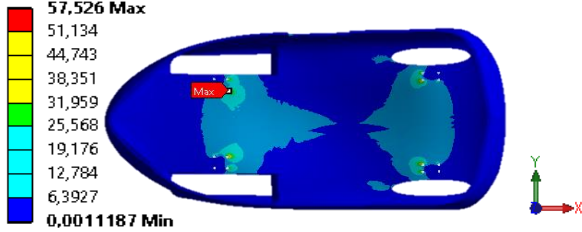
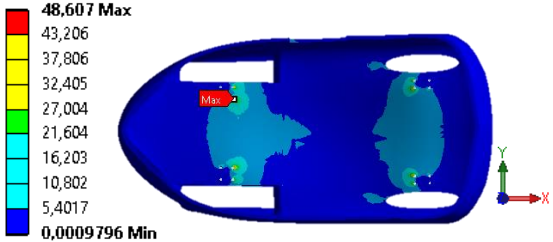
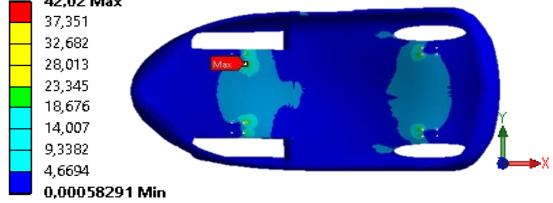
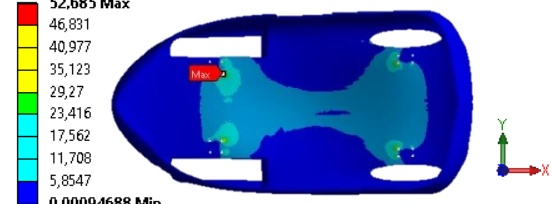
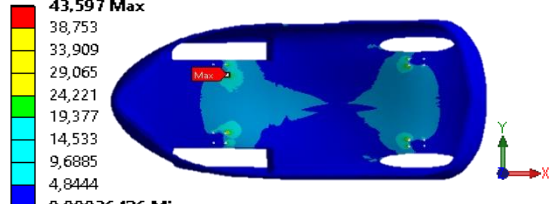
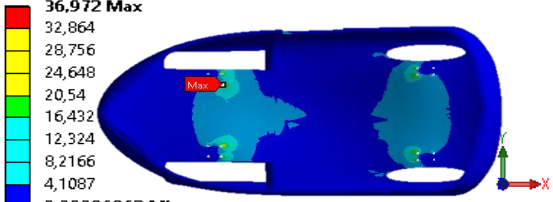
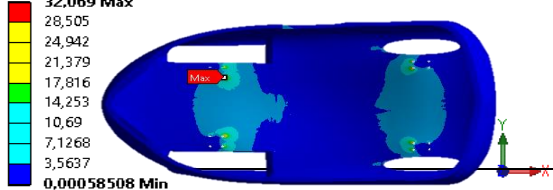
Distribusi tegangan pada pengujian *vertical bending* dapat dilihat pada Tabel 4.1 Distribusi tegangan pada tiap model hampir berada di area yang sama, yaitu sekitar kursi

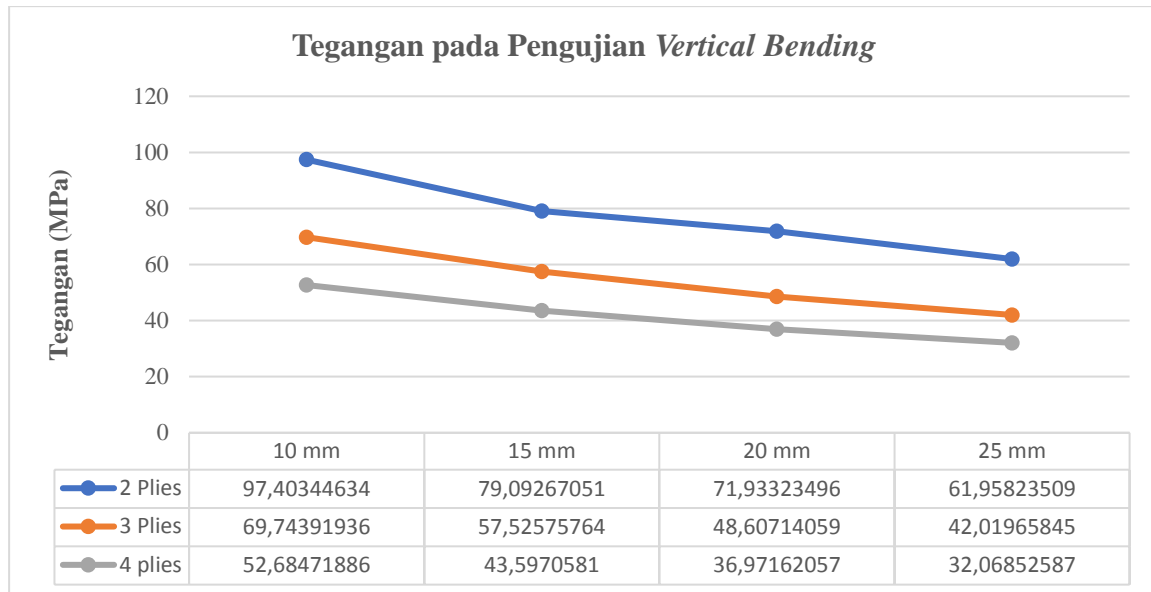
driver dan lubang-lubang joint tumpuan poros depan maupun belakang. Pada semua model dapat dilihat pada Tabel 4.1, distribusi tegangan hampir tidak terlihat pada struktur bagian atas mobil, ini dikarenakan beban hanya terjadi di bagian floor, dan menghasilkan tegangan maksimum yang sangat kecil. Dibuktikan dari warna biru pada permukaan. Sehingga tegangan tidak tersebar ke bagian atas struktur. Letak tegangan maksimum berada pada joint tumpuan poros belakang.

Tabel 4.7

Tegangan Pada Variasi Tebal *Skin* Dan Tebal *Honeycomb Core* Pada Pengujian *Vertical Bending*

No	Chassis	Tegangan (MPa)		Visual	Sumbu Kordinat
		Maksimum	Legend		
1	Model 1 Tebal = 10,8 mm [45°/45°/core 10mm] _s	97,40	97,403 Max 86,581 75,759 64,936 54,114 43,292 32,469 21,647 10,824 0,0021147 Min		
2	Model 2 Tebal = 15,8 mm [45°/45°/core 15mm] _s	79,09	79,093 Max 70,305 61,517 52,729 43,941 35,153 26,365 17,577 8,7894 0,0014677 Min		
3	Model 3 Tebal = 20,8 mm [45°/45°/core 20mm] _s	71,93	71,933 Max 63,941 55,949 47,956 39,964 31,972 23,979 15,987 7,9946 0,0022442 Min		
4	Model 4 Tebal = 10,8 mm [45°/45°/core 25mm] _s	61,95	61,958 Max 55,074 48,19 41,306 34,422 27,538 20,654 13,77 6,8857 0,0016699 Min		
5	Model 5 Tebal = 11,2mm [45°/45°/45°/core 10mm] _s	69,74	69,744 Max 61,995 54,246 46,497 38,747 30,998 23,249 15,5 7,751 0,0018901 Min		

6	Model 6 Tebal = 16,2 mm [45°/45°/45°/core 15mm] _s	57,52	 <p>57,526 Max 51,134 44,743 38,351 31,959 25,568 19,176 12,784 6,3927 0,0011187 Min</p>
7	Model 7 Tebal = 21,2 mm [45°/45°/45°/core 20mm] _s	48,60	 <p>48,607 Max 43,206 37,806 32,405 27,004 21,604 16,203 10,802 5,4017 0,0009796 Min</p>
8	Model 8 Tebal = 10,8 mm [45°/45°/45°/core 25mm] _s	42,02	 <p>42,02 Max 37,351 32,682 28,013 23,345 18,676 14,007 9,3382 4,6694 0,00058291 Min</p>
9	Model 9 Tebal = 11,6 mm [45°/45°/45°/45°/core 10mm] _s	52,68	 <p>52,685 Max 46,831 40,977 35,123 29,27 23,416 17,562 11,708 5,8547 0,00094688 Min</p>
10	Model 10 Tebal = 16,6 mm [45°/45°/45°/45°/core 15mm] _s	43,59	 <p>43,597 Max 38,753 33,909 29,065 24,221 19,377 14,533 9,6885 4,8444 0,00036426 Min</p>
11	Model 11 Tebal = 21,6 mm [45°/45°/45°/45°/core 20mm] _s	36,97	 <p>36,972 Max 32,864 28,756 24,648 20,54 16,432 12,324 8,2166 4,1087 0,00086862 Min</p>
12	Model 12 Tebal = 26,6 mm [45°/45°/45°/45°/core 25mm] _s	32,06	 <p>32,069 Max 28,505 24,942 21,379 17,816 14,253 10,69 7,1268 3,5637 0,00058508 Min</p>



Gambar 4.3 Grafik perbandingan distribusi tegangan pada pengujian *vertical bending*

Grafik pada Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan tegangan maksimum pada tiap model dengan pengujian *vertical bending*. Tegangan maksimum terjadi pada model ke-1 [45/45/ \overline{core} 10mm]s sebesar 97,40 MPa, merupakan model yang memiliki nilai tegangan tertinggi dari semua model. Sedangkan tegangan terkecil dari semua model yaitu model ke-12 [45/45/45/ \overline{core} 25mm]s sebesar 32,06 MPa. Tebal sandwich akan mempengaruhi nilai tegangan maksimum. Hal ini dikarenakan semakin tebal core dan skin dari struktur sandwich akan menurunkan nilai tegangan pada *core* dan skin.

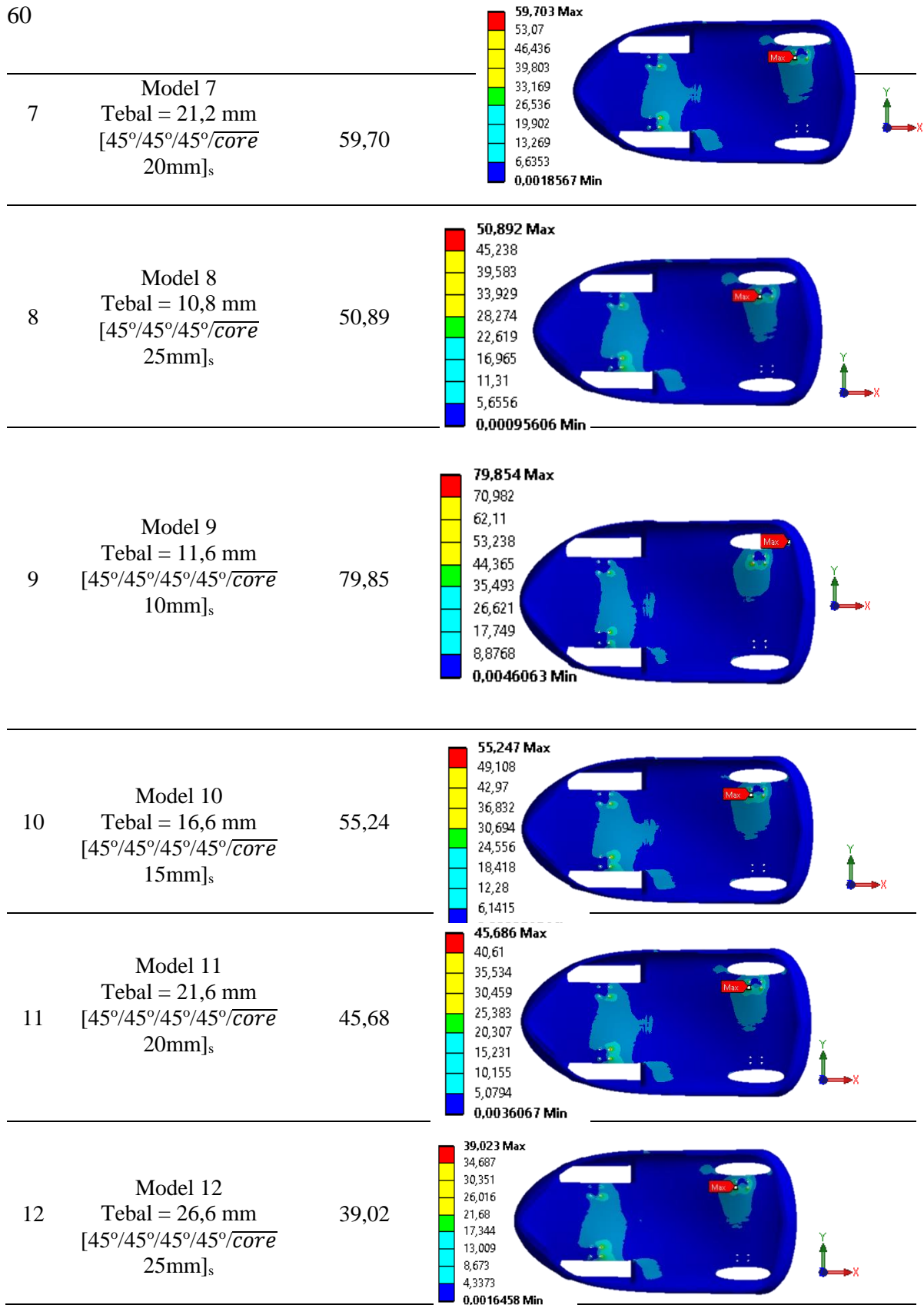
4.2.2 Analisis Tegangan Pada Variasi Tebal *Skin* dan Tebal *Honeycomb Core* Uji Torsional

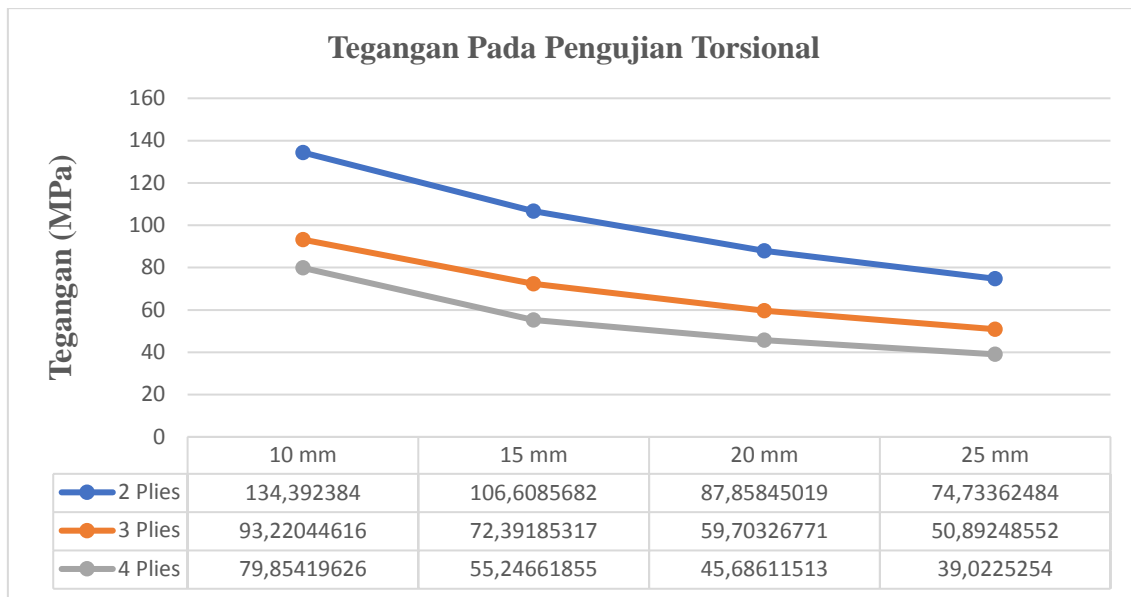
Distribusi tegangan pada pengujian *Vertical bending* dapat dilihat pada tabel 4.2 Distribusi tegangan pada tiap model hampir berada di area yang sama, yaitu sekitar joint tumpuan poros depan kanan dimana sisi tersebut adalah sisi *joint* yang tidak di *fix support* sedangkan 3 sisi join lainnya di *fix support*. Sehingga terjadi defleksi di sisi *joint* yang tidak dikenakan *fix support*. Pada semua model dapat dilihat pada tabel 4.8 distribusi tegangan hampir tidak terlihat pada struktur bagian atas mobil, ini dikarenakan tegangan maksimum sangat kecil dibuktikan dari warna biru pada permukaan atas dan bawah mobil.

Tabel 4.8

Tegangan pada Variasi Ketebalan *Skin* dan Ketebalan *Honeycomb Core* pada pengujian Torsional

No	Chassis	Tegangan (MPa)		Visual	Sumbu Kordinat
		Maksimum	Legend		
1	Model 1 Tebal = 10,8 mm [45°/45°/core 10mm] _s	134,39	<p>134,39 Max 119,46 104,53 89,597 74,665 59,734 44,802 29,87 14,938 0,0066201 Min</p>		
2	Model 2 Tebal = 15,8 mm [45°/45°/core 15mm] _s	106,61	<p>106,61 Max 94,763 82,918 71,073 59,228 47,383 35,538 23,693 11,847 0,002331 Min</p>		
3	Model 3 Tebal = 20,8 mm [45°/45°/core 20mm] _s	87,85	<p>87,85 Max 78,097 68,335 58,573 48,811 39,049 29,288 19,526 9,7639 0,0021035 Min</p>		
4	Model 4 Tebal = 10,8 mm [45°/45°/core 25mm] _s	74,73	<p>74,734 Max 66,43 58,126 49,823 41,519 33,215 24,912 16,608 8,3046 0,00095758 Min</p>		
5	Model 5 Tebal = 11,2mm [45°/45°/45°/core 10mm] _s	93,22	<p>93,22 Max 82,863 72,506 62,149 51,792 41,435 31,078 20,721 10,364 0,0070392 Min</p>		
6	Model 6 Tebal = 16,2 mm [45°/45°/45°/core 15mm] _s	73,39	<p>72,392 Max 64,349 56,305 48,262 40,219 32,176 24,132 16,089 8,0459 0,0026622 Min</p>		





Gambar 4.4 Grafik perbandingan distribusi tegangan pada pengujian torsional

Grafik pada Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan tegangan maksimum pada tiap model dengan pengujian torsional. Tegangan maksimum terjadi pada model ke-1 [45/45/ \overline{core}] sebesar 134,39 MPa, merupakan model yang memiliki nilai tegangan tertinggi dari 12 model. Sedangkan tegangan terkecil dari 12 model yaitu model ke-12 sebesar 39,02 MPa. Tebal *sandwich* akan mempengaruhi nilai tegangan maksimum. Hal ini dikarenakan semakin tebal *core* dan *skin* dari struktur *sandwich* akan meningkatkan matrik kekakuan [ABD] sehingga tegangan cenderung menurun. Hal ini sesuai dengan landasar teori tentang rumus tegangan pada *core* dan *skin*:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{Q}_{mn}]_j \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

Regangan akan mempengaruhi nilai tegangan pada *laminated sandwich*. regangan akan dijabarkan dengan rumus dibawah ini.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^{\circ}_{xx} \\ \varepsilon^{\circ}_{yy} \\ \gamma^{\circ}_{xy} \end{bmatrix} = [A^{-1}] \begin{bmatrix} N_{xx} \\ N_{yy} \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

$$\begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} = [D^{-1}] \begin{bmatrix} M_{xx} \\ M_{yy} \\ M_{xy} \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

Regangan didapatkan

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon^{\circ}_{xx} \\ \varepsilon^{\circ}_{yy} \\ \gamma^{\circ}_{xy} \end{bmatrix} + Z \begin{bmatrix} k_{xx} \\ k_{yy} \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

Dimana:

ε°_{xx} , ε°_{yy} = Regangan normal pada *midplane*

$\gamma^{\circ} xy$	= Regangan Geser pada midplane xy.
K_{xx}, k_{yy}	= Kelengkungan Bending
k_{xy}	= Kelengkungan puntir
N_{xx}, N_{yy}	= Gaya Normal arah x dan y
N_{xy}	= Resultan gaya geser
M_{xx}	= Bending momen di plane YZ
M_{yy}	= Bending momen di plane XZ
M_{xy}	= Momen Torsi
Z	= Kordinat titik terluar lamina dari <i>midplane</i>

Meningkatnya tebal *skin* dan *core* akan meningkatkan matrik kekakuan [ABD]. meningkatnya matrik kekakuan [A] akan menurunkan regangan normal midplane $\epsilon^{\circ} xx$, $\epsilon^{\circ} yy$ dan regangan geser $\gamma^{\circ} xy$ pada *midplane*. Sedangkan meningkatnya matrik kekakuan [D] akan menurunkan kelengkungan bending k_{xx} , k_{yy} dan puntir k_{xy} . Dengan mengasumsikan nilai gaya normal (N_{xx} dan N_{yy}), resultan gaya geser (N_{xy}), momen bending (M_{xx} dan M_{yy}) dan momen torsi (M_{xy}) konstan.

Nilai tegangan akan menurun seiring meningkatnya matrik kekakuan [A] dan [D]. Hal ini akan mengakibatkan tegangan yang terjadi pada *laminated sandwich* cenderung menurun. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan tegangan yang terjadi tiap ply menggunakan perhitungan manual.

Tegangan Per Ply Terhadap Ketebalan Core

Tabel 4.9

Tegangan Per Ply Model 1 [45/45/ \overline{core} 10mm]s

Lapisan	Z (mm)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
Ply 1	-5,4	7,526582914	7,526582914	168,7310308
	-5,2	7,535822973	7,535822973	168,7402718
Ply 2	-5,2	7,535822973	7,535822973	168,7402718
	-5,0	7,545063031	7,545063031	168,7495128
Core	-5,0	2,70999E-05	2,70999E-05	5,2387E-09
	0	3,32458E-05	3,32458E-05	5,24562E-09
	5	3,93918E-05	3,93918E-05	5,25255E-09
Ply 3	5	8,007065973	8,007065973	169,2115631
	5,2	8,016306032	8,016306032	169,2208041
Ply 4	5,2	8,016306032	8,016306032	169,2208041
	5,4	8,025546091	8,025546091	169,2300451

Tabel 4.10

Tegangan Per Ply Model 2 [45/45/core 15 mm]s

Lapisan	Z (mm)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
Ply 1	-7,9	0,884105414	0,884105414	0,884980285
	-7,7	0,89334228	0,89334228	0,89422129
Ply 2	-7,7	0,89334228	0,89334228	0,89422129
	-7,5	0,902579146	0,902579146	0,903462296
Core	-7,5	2,4013E-05	2,4013E-05	2,71E-11
	0	3,32286E-05	3,32286E-05	3,74944E-11
	7,5	4,24442E-05	4,24442E-05	4,78889E-11
Ply 3	7,5	1,595344066	1,595344066	1,596537702
	7,7	1,604580932	1,604580932	1,605778707
Ply 4	7,7	1,604580932	1,604580932	1,605778707
	7,9	1,613817798	1,613817798	1,615019713

Hal ini di buktikan pada model 1 [45/45/core 10mm]s dan model 2 [45/45/core 15mm]s. Model 1 dan model 2 memiliki ketebalan *skin* yang sama yaitu 4 *plies* dengan perbedaan tebal *core* 10mm dan 15mm. Dari hasil perhitungan dengan persamaan (4-4) didapatkan perbandingan regangan yang terjadi pada model 1 dan model 2 mengalami penurunan tegangan arah x, y dan tegangan geser xy tiap lapisnya. Hal ini dikarenakan ketebalan core akan mempengaruhi kekakuan dari struktur *sandwich*, sehingga tegangan yang terjadi cenderung menurun.

Tegangan Per Ply Terhadap Tebal Skin

Tabel 4.11

Tegangan Per Ply Model 1 [45/45/core 10 mm]s

Lapisan	Z (mm)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
Ply 1	-5,4	7,526582914	7,526582914	168,7310308
	-5,2	7,535822973	7,535822973	168,7402718
Ply 2	-5,2	7,535822973	7,535822973	168,7402718
	-5,0	7,545063031	7,545063031	168,7495128
Core	-5,0	2,70999E-05	2,70999E-05	5,2387E-09
	0	3,32458E-05	3,32458E-05	5,24562E-09
	5	3,93918E-05	3,93918E-05	5,25255E-09
Ply 3	5	8,007065973	8,007065973	169,2115631
	5,2	8,016306032	8,016306032	169,2208041
Ply 4	5,2	8,016306032	8,016306032	169,2208041
	5,4	8,025546091	8,025546091	169,2300451

Tabel 4.12

Tegangan Per Ply Model 5 [45/45/45/core 10 mm]s

Lapisan	Z (mm)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
Ply 1	-5,6	0,662843795	0,662843795	0,663017031
	-5,4	0,66892611	0,66892611	0,669099756
Ply 2	-5,4	0,66892611	0,66892611	0,669099756
	-5,2	0,675008425	0,675008425	0,675182482
Ply 3	-5,2	0,675008425	0,675008425	0,675182482
	-5	0,68109074	0,68109074	0,681265207
Core	-5	1,81208E-05	1,81208E-05	2,04345E-11
	0	2,21665E-05	2,21665E-05	2,49957E-11
	5	2,62121E-05	2,62121E-05	2,9557E-11

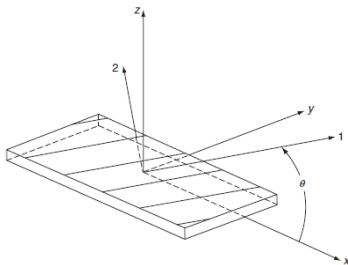
Lapisan	Z (mm)	σ_{xx} (MPa)	σ_{yy} (MPa)	τ_{xy} (MPa)
Ply 4	5	0,985206486	0,985206486	0,98540146
	5,2	0,991288801	0,991288801	0,991484185
Ply 5	5,2	0,991288801	0,991288801	0,991484185
	5,4	0,997371116	0,997371116	0,99756691
Ply 6	5,4	0,997371116	0,997371116	0,99756691
	5,6	1,003453431	1,003453431	1,003649635

Hal ini di buktikan pada model 1 [45/45/ \overline{core} 10mm]s dan model 5 [45/45/45/ \overline{core} 10mm]s. Model 1 dan model 5 memiliki ketebalan *core* yang sama yaitu 10 mm dengan perbedaan ketebalan *skin*. Dari hasil perhitungan dengan persamaan (4-4) didapatkan perbandingan tegangan arah x, y dan geser xy pada model 1 dan model 5. Tegangan arah x, y serta regangan geser xy mengalami kecenderungan menurun setelah penambahan skin. Hal ini dikarenakan ketebalan skin akan mempengaruhi kekakuan dari struktur *sandwich*, sehingga tegangan yang terjadi cenderung menurun.

4.3 Hasil Evaluasi Pada Chassis

4.3.1 Validasi Pemodelan Material Komposit

Validasi pemodelan material diperlukan untuk mengecek kebenaran data yang didapatkan dari perhitungan manual dan *software ansys* mengenai data stiffness matrik [ABD]. Matrik [ABD] akan berpengaruh terhadap regangan dan tegangan dengan penambahan tebal *skin* dan *core*.



Gambar 4.5 Sistem kordinat lamina

Matrix kekakuan lamina [Q] merupakan fungsi dari sifat elastisitas dari masing-masing lamina. Matrix kekakuan lamina [Q] dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (4-8)$$

Dimana:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \quad (4-9)$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \quad (4-10)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} \quad (4-11)$$

$$Q_{66}=G_{12} \quad (4-12)$$

Dimana:

E_1 = Modulus Young *Longitudinal*

E_2 = Modulus Young *Transverse*

ν_{12} = Poisson Ratio bidang 1-2

G_{12} = Modulus Geser Bidang 1-2

Dalam struktur *sandwich* terdiri dari skin dan core. *Skin* menggunakan material fiber *carbon woven* dengan sudut 45° jenis *prepreg*. *Prepreg* adalah material matrik polimer *termoset* seperti epoxy sudah tercampur oleh serat fiber seperti *carbon*. Sehingga struktur *sandwich* terdiri dari 2 matrik kekakuan yaitu kekakuan *core* dan *skin*.

$$[Q]_{cf} = \begin{bmatrix} 70707.07 & 7070.71 & 0 \\ 7070.71 & 70707.07 & 0 \\ 0 & 0 & 5000.00 \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (4-13)$$

$$[Q]_{H.core} = \begin{bmatrix} 1.316 & 0.645 & 0 \\ 0.645 & 1.316 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (4-14)$$

Dimana:

$[Q]_f$ = Matrik kekakuan *carbon fiber*

$[Q]_c$ = Matrik kekakuan *core*

Dikarenakan dalam penelitian menggunakan *skin carbon fiber* dengan sudut orientasi 45° . Maka matrik kekakuan material *carbon fiber* $[Q]_{cf}$ di transformasi sebesar 45° (θ) seperti gambar 12. Maka persamaan matrik kekakuan lamina $[\bar{Q}]$ sebagai berikut.

$$[\bar{Q}] = [T1]^{-1} [Q] [T2] \quad (4-15)$$

Nilai $[T1]$ dan $[T2]$ sebagai berikut

$$[T1] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

$$[T2] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ m^2 & n^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

Dimana:

m = $\cos \theta$

n = $\sin \theta$

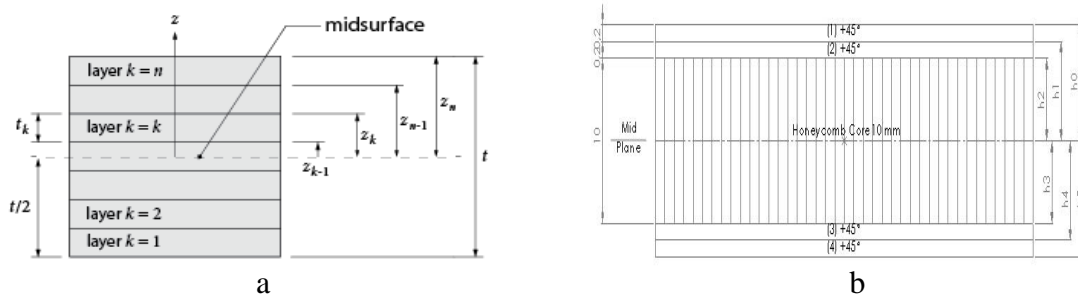
$$[\bar{Q}]_{f45^\circ} = \begin{bmatrix} 43888.89 & 33888.89 & 0 \\ 33888.89 & 43888.89 & 0 \\ 0 & 0 & 31818.18 \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

Laminate terdiri dari lapisan lapisan (lamina) yang tersusun dan terikat. Kekakuan *laminate* dapat dihitung dengan matrik [ABD]. Matrik [A] mendeskripsikan kekakuan ekstensional, matrik [B] mendeskripsikan kekakuan ekstensional dan bending. Matrik [D] mendeskripsikan kekakuan laminate terhadap bending. Nilai tersebut dapat dihitung dengan persamaan:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k - z_{k-1}) \quad (4-19)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (4-20)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{ij})_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (4-21)$$



Gambar 4.6 geometri laminate persamaan (4-19), (4-20) dan (4-21) (a) dan geometri laminate model *chassis* 1 (b)

Matrik [ABD] adalah gabungan dari matrik [A], [B] dan [D]. penjelasan matrik [ABD] sebagai berikut:

$$[ABD] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (4-22)$$

Hasil dari perhitungan matrik kekakuan [ABD] model 1 [45/45/core10mm]s secara manual dibandingkan dengan *Classical Lamination Theory (CLT) Stiffness Matrix* analisis menggunakan *software Ansys 18.2 ACP (pre)* sebagai berikut:

Matrik [A] perhitungan manual didapatkan sebagai berikut:

$$[A]_{[45/45/\text{Core } 10\text{mm}]} = \begin{bmatrix} 72660 & -15565,9 & 1203 \\ -15565,9 & 72518,8 & 1203 \\ 1203 & 1203 & 25583,9 \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (4-23)$$

Matrik [A] dari CLT *Stiffness Matrik Ansys*

72664	-15694	1202.7
-15694	72475	1202.7
1202.7	1202.7	25578

Gambar 4.7 *Stiffness matrix* [A] pada laminate model 1 [45/45/core 10mm]s

Matrik [B] = 0, Karena *laminate* simetri

Matrik [D] perhitungan manual didapatkan sebagai berikut:

$$[D]_{[45/45/\text{Core } 10\text{mm}]} = \begin{bmatrix} 1,9\text{e}+6 & -4,3\text{e}+5 & 3,2\text{e}+4 \\ -42642,8 & 1,5\text{E}+6 & 3,2\text{e}+4 \\ 32545,36 & 3,2\text{e}+4 & 9,4\text{e}+05 \end{bmatrix} \text{MPa} \quad (4-24)$$

Matrik [D] dari CLT *Stiffness Matrix* Ansys

1.9561e+06	-4.276...	32538
-4.276e+05	1.9545...	32538
32538	32538	6.9198...

Gambar 4.8 *Stiffness matrix* [D] pada laminate model 1 [45/45/*core* 10mm]s

Perhitungan diatas dibandingkan dengan analisis *CLT Laminate Stiffness* pada *Ansys Composite pre* dan didapatkan hasil yang mendekati. Sehingga pemodelan material ini dapat digunakan untuk mensimulasikan struktur komposit.

4.3.2 Prediksi Massa *Chassis*

Prediksi massa *chassis* diperlukan untuk melakukan perbandingan dengan *chassis* sebelumnya. *Chassis* yang ringan dan kuat adalah salah satu tujuan penelitian ini. Harapannya dapat mereduksi massa *chassis* dari *chassis* sebelumnya sehingga massa mobil akan tereduksi. Semakin ringan bobot mobil akan menurunkan konsumsi energinya. Prediksi massa *chassis* dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Area Surface} = 6,32 \text{ m}^2$$

$$\text{Density Carbon Fiber} = 1480 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Density Honeycomb Core Nomex} = 80 \text{ kg/m}^3$$

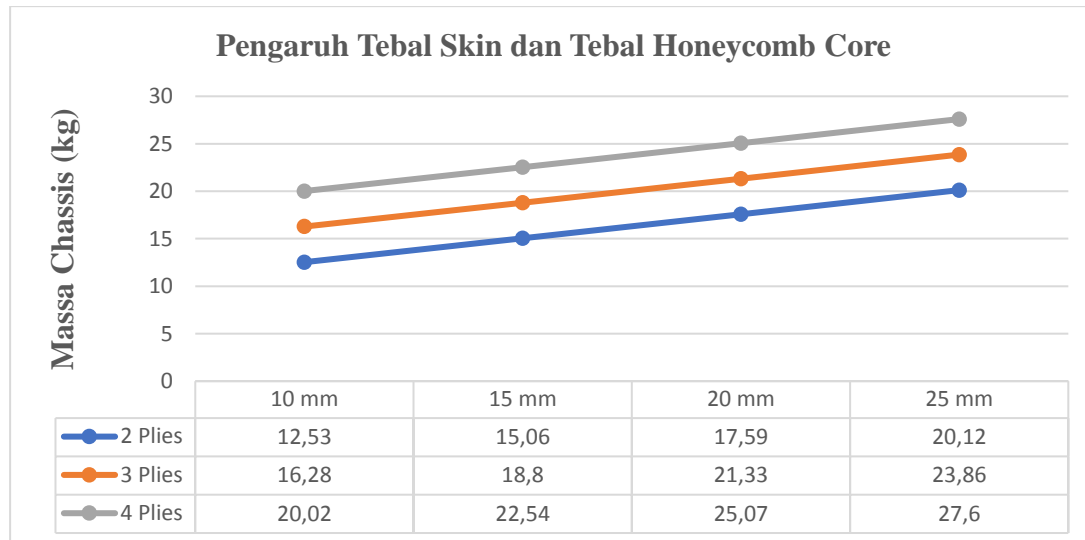
$$\text{Tebal ply} = 0,0002 \text{ m}$$

Prediksi massa *chassis* dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Bobot Skin (kg)} = A(\text{m}^2) \times \text{jumlah plies} \times \text{tebal ply} \times \rho_{c.fiber}$$

$$\text{Bobot Honeycomb Core (kg)} = A(\text{m}^2) \times \text{tebal ply} \times \rho_{\text{honeycomb core}}$$

$$\text{Bobot total chassis (kg)} = \text{Bobot Skin} + \text{Honeycomb Core}$$



Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Massa *chassis* dengan variasi tebal *skin* dan tebal *honeycomb core*.

Grafik pada Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan massa *chassis* tiap model. Massa paling ringan pada model ke-1 [45/45/ \overline{core} 10mm]s sebesar 12,53 kg. Sedangkan massa paling besar pada model ke-12 [45/45/45/ \overline{core} 25mm]s sebesar 27,6 kg. Sedangkan bobot *body* 9 kg dan *frame* 21 kg urban concept tahun 2017 sebesar 30 kg. Dalam penelitian ini estimasi model 1- 12 akan mereduksi bobot 10% hingga 40% dari bobot *body* dan *frame* sebelumnya.

4.3.2 Evaluasi Kegagalan Struktur Sandwich Pada Chassis

IRF adalah nilai yang menunjukkan kegagalan suatu material. Material dikatakan gagal apabila nilai $IRF > 1$. Nilai IRF didapatkan dari perbandingan nilai terbesar dari tegangan prinsipal dan tegangan maksimal komposit (*maximum stress*).

$$RF = \frac{\sigma_f}{\sigma_{applied}} \quad (4-25)$$

$$RF = \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{applied}} \quad (4-26)$$

$$IRF = \frac{1}{RF} \quad (4-27)$$

Dimana:

σ_f = Tegangan maksimal material

$\sigma_{applied}$ = Tegangan yang diberikan

ε_f = Regangan maksimal material

$\varepsilon_{applied}$ = Regangan yang diberikan

Dari hasil tersebut diambil nilai terbesar diantara dua kriteria tegangan maksimal atau regangan maksimal. Hasil perhitungan tersebut dijelaskan Tabel 4.13.

Tabel 4.13

Inverse Reserve Factor

Model-n	<i>Inverse Reserve Factor</i>	
	<i>Torsional</i>	<i>Vertical Bending</i>
1	0,99	0,67
2	0,86	0,59
3	0,67	0,49
4	0,59	0,43
5	0,67	0,48
6	0,54	0,39
7	0,46	0,37
8	0,40	0,29
9	0,51	0,37
10	0,41	0,30
11	0,35	0,25
12	0,30	0,21

Dari data hasil pengujian dengan pembebanan *vertical bending* dan torsional bahwa model yang mempunyai nilai IRF dibawah 1 hal ini tegangan dan regangan yang dibebankan pada *chassis* tidak mencapai nilai tegangan dan regangan maksimal material sehingga seluruh model chassis mempunyai kriteria aman untuk digunakan.

