

Analisis *Torsional Rigidity* dan Uji Tabrak pada *Chassis Go-kart Tonykart* menggunakan *Finite Element Method*

Benedictus Bayu Bagaskoro dan Julendra Bambang Ariatedja
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ariatedja@me.its.ac.id

Abstrak—*Torsional rigidity* pada chassis go-kart sangatlah penting, karena go-kart dituntut lincah saat berbelok dengan ketiadaan differential gear dan sistem suspensi dalam chassis go-kart. Maka dari itu chassis harus cukup fleksibel untuk meningkatkan kemampuan berbeloknya. Selain itu, go-kart merupakan kendaraan yang terbuka untuk pengendaranya, dibutuhkan chassis yang dapat terjamin keamanan pengendaranya saat terjadi benturan. Pengujian kali ini membandingkan 2 bentuk element saja, yaitu solid element dan surface element untuk pengujian *Torsional Rigidity*, karena dilihat dari *thickness ratio* yang < 1 , geometri chassis ini cocok untuk menggunakan surface element. Pengujian ini mencoba membandingkan hasil *torsional rigidity* dari chassis go-kart dengan 2 bentuk elemen tersebut. Pengujian impact dilakukan untuk mengetahui keamanan chassis tersebut akibat benturan. Hasil dari simulasi kali ini berupa *torsional rigidity*, yang menjelaskan kekakuan gokart tersebut, lalu juga akan didapatkan bentuk dan nilai deformasi chassis tersebut dari uji impact. Hasil kekakuan dari chassis Tonykart dengan menggunakan surface element yaitu sebesar 166,17 Nm/deg untuk ukuran elemen 4,5 mm dan 172,47 Nm/deg untuk ukuran elemen 3,5 mm, untuk solid element sebesar 188,6 Nm/deg. Hasil ini kemudian juga dibandingkan dengan eksperimen *torsional rigidity* pada oleh Solazzi yang memiliki nilai kekakuan sebesar 175 Nm/deg. Surface element mempunyai perbedaan terhadap eksperimen sebesar 5,1 % untuk ukuran elemen 4,5 mm dan 1,44% untuk ukuran elemen 3,5 mm, sementara solid element mempunyai perbedaan sebesar 7,8 %. Hasil uji tabrak menyatakan bahwa chassis Tonykart ini dinilai aman dari uji tabrak depan, belakang dan samping. Bentuk dan nilai deformasi yang terjadi tidak melewati batasan deformasi yang diizinkan.

Kata Kunci—Chassis Go-kart, Deformasi, Finite Element Method, *Torsional Rigidity*, Uji Tabrak.

I. PENDAHULUAN

SEIRING berjalannya waktu, proses perancangan suatu produk semakin canggih dan kompleks. Untuk mendapatkan hasil yang terbaik dalam proses tersebut dibutuhkan analisa-analisa teknik dari *design* suatu produk tersebut. Berbagai metode analisa perancangan telah dilakukan oleh manusia untuk menunjang hal tersebut, mulai dari analisa sederhana sampai dengan analisa yang kompleks menggunakan bantuan komputer. Salah satu metode yang cukup populer dan sering dilakukan dalam sebuah analisa adalah *finite element method*.

Terdapat berbagai metode dalam melakukan analisa menggunakan FEM. Salah satunya dengan meninjau dari bentuk elemen yang diaplikasikan pada benda uji tersebut. Terdapat 3 bentuk element yang dapat dipilih untuk proses

analisa, yaitu *solid element*, *surface element*, dan *beam element*. Bentuk tersebut dibagi berdasarkan jumlah dimensi pada element tersebut [1]. Pada pengujian ini penulis hanya membandingkan 2 bentuk element saja, yaitu *solid element* dan *surface element*. Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Wibisana, chassis Tonykart ini mempunyai nilai *torsional rigidity* sebesar 188,69 Nm/deg [2]. Penelitian itu dilakukan dengan menggunakan *solid element*. Eksperimen khusus untuk mendapatkan nilai *torsional rigidity* dari chassis go-kart juga pernah dilakukan sebelumnya oleh Solazzi, dan didapatkan nilai *torsional rigidity* sebesar 175 Nm/deg [3]. Nilai-nilai pada penelitian sebelumnya ini nantinya akan dijadikan acuan komparasi untuk melihat tingkat akurasi dari pengujian kali ini.

Dilihat dari bentuk geometri benda uji, yaitu chassis go-kart Tonykart, memungkinkan untuk melakukan analisis menggunakan bentuk elemen *surface*. Hal itu dikarenakan *thickness ratio* dari benda uji tersebut bernilai lebih kecil dari 1. Maka dari itu penulis ingin menggunakan metode *surface element* pada permasalahan yang pernah diselesaikan dengan metode *solid element*. *Surface/Shell Element* ini cukup efektif untuk merepresentasikan hasil pengujian. Hal ini berpengaruh kepada waktu pengujian yang lebih singkat dari *solid element*. *Surface/Shell element* adalah penyederhanaan secara matematis dari solid element.

Pengujian ini dilakukan dengan harapan dapat mendapatkan cara yang lebih efisien dalam melakukan analisa *Finite Element Method*. Dalam pengujian kali ini, fleksibilitas go-kart akan didapatkan dalam simulasi pada saat beban kendaraan berbelok dan juga dengan beban *torsional*. Sementara simulasi uji tabrak akan dilakukan untuk mendapatkan kekuatan chassis yang ada, dan deformasi yang terjadi pada saat terjadi tabrakan, apakah aman untuk pengemudi atau tidak.

II. URAIAN PENELITIAN

A. *Torsional Rigidity* pada Chassis Go-kart

Salah satu hal penting pada chassis adalah nilai kekakuan chassis tersebut. Besarnya nilai kekakuan ini dapat dicari dengan menggunakan *torsional rigidity*. *Torsional rigidity* dapat dihitung dengan menggunakan memberikan momen torsi pada chassis. Pada penelitian kali ini pengujian *torsional rigidity* disimulasikan menggunakan metode elemen hingga. Pada analisa kali ini, beban diberikan pada dua sisi yang berlawanan pada bagian tumpuan roda depan chassis yang membentuk momen kopel. Sementara pada bagian tumpuan roda belakang chassis digunakan fix support.

Pengujian tersebut akan menghasilkan nilai torsi dan sudut punter yang mana nantinya dapat diubah menjadi nilai torsional rigidity [4].

Besarnya torsi (T) dan sudut puntir (θ) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$T = \left(\frac{F_1 + F_2}{2} \right) \times L \tag{1}$$

$$\theta = \arcsin \left(\frac{|\delta_1| + |\delta_2|}{L} \right) \tag{2}$$

Sehingga dapat dicari besar *torsional rigidity* (K) dari *chassis* yang diteliti yaitu,

$$K = T / \theta \tag{3}$$

Menurut Biancolini dalam penelitiannya merekomendasikan bahwa untuk memiliki kinerja yang baik, nilai kekakuan dari chassis go-kart haruslah berkisar antara 165 ~ 169 (N.m/deg) [5]. Sehingga chassis go-kart yang nantinya akan diteliti diharapkan dapat memenuhi rekomendasi tersebut.

B. Meshing

Tabel 1 merupakan hasil uji konvergensi dari pembebanan torsional. Uji konvergensi ini dilakukan pada gaya sebesar 0,2 W. Pada uji konvergensi ini didapatkan nilai tegangan maksimal. Variabel yang berubah dari uji konvergensi ini adalah ukuran elemen. Dimana dari nilai-nilai yang didapatkan tersebut perbedaan antar variabelnya dibawah 5%. Jika sudah di bawah 5%, maka model ini dianggap konvergen. Pada tegangan maksimal dapat dilihat nilai tegangan juga berubah seiring perubahan jumlah elemen. Pada tabel uji konvergensi di atas, terlihat bahwa ukuran elemen 3.5 mm nilai perbedaan stress dibawah 5%.

Tabel 1.

Hasil uji konvergensi dengan pengurutan ukuran elemen.

Ukuran elemen	Node	Element	Element quality	Stress Max	Perbedaan Stress (%)
10 mm	26812	53073	0.79	130.13	0
9 mm	27121	55212	0.81	119.45	-8.941
8 mm	28929	57261	0.82	122.31	2.394
7 mm	30847	61026	0.85	114.06	-6.745
6 mm	30547	60319	0.91	117.16	4.191
5.5 mm	33976	67125	0.92	112.25	-4.374
5 mm	37817	74728	0.93	112.86	0.543
4.5 mm	43110	85241	0.94	108.3	-4.040
4 mm	52725	104368	0.95	115.47	6.620
3.5 mm	65163	129101	0.97	116.25	0.676
3 mm	86058	170685	0.98	124.47	7.071

Pada pengujian kali ini diambil ukuran elemen 3.5 mm karena ukuran tersebut merupakan ukuran yang paling kecil perbedaan *stress* di bawah 5% dan juga mempunyai *element quality* yang paling besar, yaitu sebesar 97 %.

Pada pengujian kali ini juga dilakukan pengujian menggunakan ukuran elemen 4,5 mm, karena pengujian terdahulu yang dilakukan oleh Wibisana yang dijadikan acuan komparasi pengujian kali ini juga menggunakan ukuran elemen 4,5 mm dengan bentuk *tetrahedral*. Hal ini dilakukan agar dapat menghasilkan komparasi kedua elemen yang baik dengan spesifikasi elemen yang hampir sama antara keduanya.

C. Boundary Condition Pengujian Torsional Rigidity

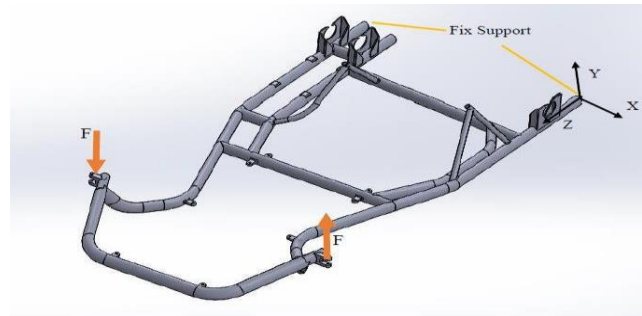
Pada simulasi torsional rigidity kali ini chassis go-kart akan diberikan tumpuan berupa tumpuan tetap pada kedua

bagian belakang chassis. Beban yang bekerja akan diberikan ke bagian depan sebesar F, seperti terlihat pada gambar 1. Simulasi akan dilakukan dua kali dengan arah puntir yang berlawanan. Beban akan diberikan di bagian kanan dan kiri go-kart dengan besar yang sama tetapi arahnya berlawanan. Besarnya F seperti terlihat pada tabel 2. divariasikan mulai dari 0,2 - 1,0 x berat kendaraan sendiri.

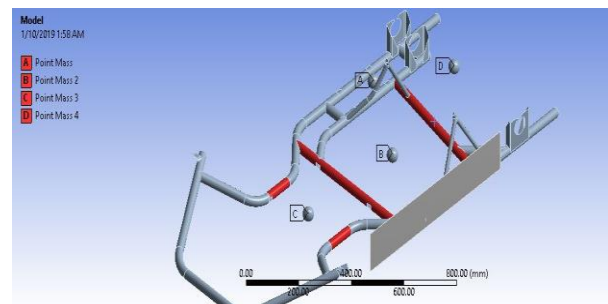
Tabel 2.

Rincian pembebanan yang diberikan..

Variasi Beban	F
0,2 W	254,016 N
0,4 W	508,032 N
0,6 W	762,048 N
0,8 W	1016,064 N
1,0 W	1270,080 N



Gambar 1. Tumpuan dan pembebanan pada chassis go-kart.

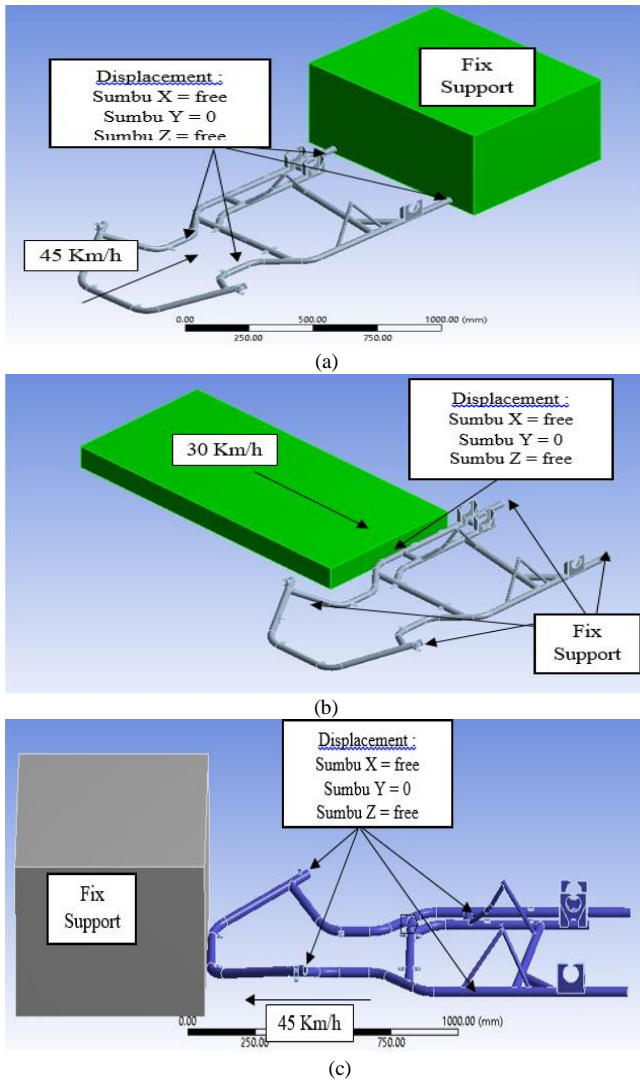


Gambar 2. Letak titik massa komponen chassis Tonykart.

D. Boundary Condition Pengujian Tabrak

Simulasi impact kali ini akan dilakukan sebanyak 3 kali, yaitu front impact, rear impact, dan side impact. End time pada tiap simulasi dinamis kali ini diatur pada 0,05 detik dengan cycle sebanyak 300.000 cycles. Diharapkan pada saat 0,05 setelah kondisi awal go-kart sudah menabrak secara sempurna. Pada tiap simulasi impact kali ini tumpuan tetap diberikan kepada stationary rigid wall untuk uji tabrak depan dan belakang, sementara untuk uji tabrak samping, tumpuan tetap diberikan kepada chassis go-kart itu sendiri. Sementara beban kendaraan seperti mesin, pengendara, tangki, dan drivetrain juga dimasukkan sesuai dengan titik berat masing-masing komponen tersebut, seperti terlihat pada gambar 2.

Simulasi *front impact* ini akan meletakkan tumpuan tetap (*fixed support*) pada *stationary rigid wall* di bagian depan chassis tersebut. Pada chassis go-kart diberikan pembebanan komponen-komponen sesuai dengan titik berat yang sudah di jelaskan diatas. Kemudian *displacement* pada go-kart diatur untuk bergerak bebas pada koordinat X, dan Z saja agar go-kart tidak turun atau bergerak ke arah sumbu Y. Setelah itu go-kart diberikan kecepatan sebesar 45 km/h. Kemudian dimasukkan *standard earth gravity* sebesar 9,81 m/s² ke arah sumbu Y negatif. Jarak antara chassis dan *stationary rigid wall* sejauh 0,5 mm, hal ini bertujuan agar waktu *end time* pada simulasi tidak terlalu besar. *End time* yang besar akan berimbas ke durasi simulasi yang panjang.



Gambar 3. Boundary condition pengujian tabrak.(a) front impact; (b) rear impact; dan (c) side impact

Simulasi *front impact* ini akan meletakkan tumpuan tetap (*fixed support*) pada *stationary rigid wall* di bagian depan *chassis* tersebut. Pada *chassis go-kart* diberikan pembebanan komponen-komponen sesuai dengan titik berat yang sudah di jelaskan diatas. Kemudian *displacement* pada *go-kart* diatur untuk bergerak bebas pada koordinat X, dan Z saja agar *go-kart* tidak turun atau bergerak ke arah sumbu Y. Setelah itu *go-kart* diberikan kecepatan sebesar 45 km/h. Kemudian dimasukan *standard earth gravity* sebesar 9,81 m/s² ke arah sumbu Y negatif. Jarak antara *chassis* dan *stationary rigid wall* sejauh 0,5 mm, hal ini bertujuan agar waktu *end time* pada simulasi tidak terlalu besar. *End time* yang besar akan berimbas ke durasi simulasi yang panjang.

Simulasi *rear impact* ini memposisikan *stationary rigid wall* sebagai *fixed support* pada bagian belakang *chassis*. Pada *chassis go-kart* diberikan pembebanan komponen-komponen sesuai dengan titik berat yang sudah di jelaskan diatas. Kemudian *displacement* pada *gokart* diatur untuk bergerak bebas pada koordinat X, dan Z saja. Kemudian dimasukan *standard earth gravity* sebesar 9,81 m/s² ke arah sumbu Y negatif. Setelah itu *go-kart* diberikan kecepatan sebesar 45 km/h bergerak kearah sumbu Z negatif.

Pada kondisi tabrak samping, *gokart* disimulasikan mendapat *impact* dari eksternal. Maka dari itu *fix support* diletakan pada tumpuan ke 4 sisi *go-kart*. Lalu benda uji diberikan kecepatan sebesar 30 km/h, dengan *displacement* bebas pada sudut X, Z saja. Material benda uji disamakan

dengan material *chassis go-kart*, yaitu *chromemolly*. *Standard earth gravity* diberikan sebesar 9,81 m/s² ke arah sumbu Y negatif.

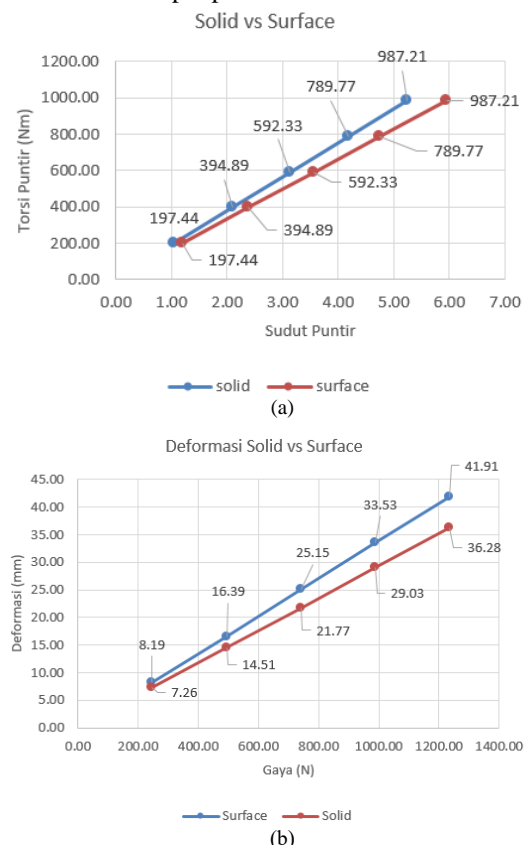
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Komparasi Hasil Pengujian Solid Element dan Surface Element

Hasil pengujian ini kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian Wibisana pada tahun 2018 yang menggunakan bentuk elemen solid pada pengujian *torsional rigidity*. Tujuan pengujian ini adalah mencari tahu perbedaan penggunaan elemen solid dan *surface* dalam pengujian *torsional rigidity* pada *chassis Tony Kart* ini. Pada torsi puntir dengan besar sama-sama 197,44 Nm, hasil sudut puntir yang didapatkan oleh elemen solid adalah 1,05 deg, hasil tersebut lebih kecil daripada sudut puntir yang didapatkan oleh elemen *surface* yaitu sebesar 1,19 deg. Saat torsi puntir sebesar 987,21 Nm pun hasil yang didapatkan juga mengatakan bahwa elemen *surface* memiliki nilai yang lebih besar daripada elemen solid, yaitu 5,95 deg, sementara elemen solid 5,24 deg.

Sementara itu perbedaan hasil deformasi terhadap sudut Y dapat dilihat dari grafik pada gambar 4 (b). Terlihat dari grafik tersebut hasil deformasi terhadap sudut Y pada elemen solid sebesar 7.26 mm pada saat diberikan gaya paling kecil yaitu 246,8 N, sementara untuk elemen *surface* didapatkan nilai 8,19 mm. Sementara pada saat gaya yang diberikan sebesar 1234,02 N, hasil deformasi yang terjadi pada elemen solid menunjukkan angka yang lebih kecil seperti grafik-grafik lainnya, yaitu sebesar 36,28 mm sementara untuk *surface* elemen hasil yang didapatkan adalah sebesar 41,91 mm.

Hal ini menyebabkan hasil *torsional rigidity* kedua bentuk elemen tersebut terdapat perbedaan. Pada elemen solid



Gambar 4. Grafik pengujian *solid vs surface*. (a) Torsi puntir terhadap sudut puntir; dan (b) Deformasi terhadap gaya.

didapatkan kekakuan *chassis* go-kart sebesar 188,6 Nm/deg sementara pada elemen *surface* kekakuan yang didapatkan adalah 166.17 Nm/deg.

Tabel 3. menjelaskan perbedaan penggunaan bentuk elemen pada pengujian kali ini. Kedua bentuk elemen menggunakan jenis elemen yang sama pula yaitu berbasis *triangle*, dengan ukuran elemen yang sama yaitu 4,5 mm. Terlihat jelas bahwa elemen solid mempunyai jumlah elemen yang jauh lebih banyak daripada elemen *surface*. Penggunaan elemen solid mempunyai 464.359 elemen, sementara penggunaan elemen *surface* mempunyai 85.241. Hampir 5 kali lipat perbedaan jumlah elemen yang ada.

Tabel 3.

Tabel perbandingan elemen pada pengujian *torsional rigidity*.

Bentuk Element	Jumlah Node	Jumlah Elemen	Element Quality
Surface-Tetra	43110	85241	0.943
Solid-Tetra	838738	464359	0.735

Tabel 4.

Tabel perbandingan waktu.

Pre-Processing Time (s)	Proses Meshing (s)	Waktu Simulasi (s)	Total (s)	Waktu (s)
Surface	189	15	25	229
Solid	0	58	439.2	497.2

Jumlah elemen yang banyak tersebut kemudian berdampak kepada jumlah node yang lebih banyak pula pada elemen solid, yaitu sebanyak 838.738 dibanding jumlah elemen pada *surface* yaitu sebanyak 43.110 node. Selain itu *element quality* juga berpengaruh terhadap perbedaan yang terjadi. Dilihat dari table di atas, kualitas elemen *surface* lebih besar daripada elemen solid. Elemen *surface* mempunyai kualitas elemen 94%, sementara solid mempunyai kualitas elemen 73,5%. Dalam pengujian kali ini, seharusnya elemen *surface* memiliki hasil yang lebih mendekati aslinya daripada elemen solid. Hal itu terjadi karena elemen *surface* mempunyai kualitas elemen yang hampir mendekati 100%, atau berarti proses *meshing* elemen *surface* tersebut hampir mendekati sempurna.

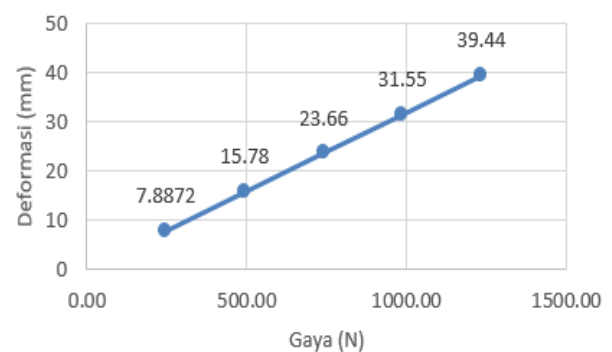
Dari tabel 4. terlihat bahwa penggunaan elemen *surface* menghemat waktu yang sangat banyak. Dari waktu sebelum melakukan simulasi, *surface element* memakan waktu 189 detik. Waktu ini digunakan untuk proses perubahan geometri solid atau geometri aslinya menjadi geometri *surface*. Proses ini berlangsung di *software DesignModeler*. Sementara tidak terdapat *pre-processing* dalam solid elemen, karena penggunaan solid elemen dapat langsung diaplikasikan pada model. Dilihat dari proses *meshing*, terlihat *surface element* memakan waktu 15 detik sementara untuk elemen solid memakan waktu sebanyak 58 detik. Hal ini dikarenakan jumlah node dan elemen pada elemen solid lebih banyak secara signifikan daripada elemen *surface*. Elemen solid menyelesaikan simulasi dengan waktu 439.2 detik, atau 7 menit dan 19 detik. Sementara untuk elemen *surface* waktu yang dijalankan jauh lebih sedikit, yaitu 25 detik. Total waktu pengerjaan pada elemen solid pada satu variasi pengujian ini adalah 497,2 detik, atau sekitar hampir 8 menit. Sementara untuk elemen *surface* 229 detik atau sekitar 3 menit dan 49 detik. Untuk pengujian kali ini terdapat 5 variasi pembebanan. Total waktu untuk pengujian kali ini dengan 5

variasi pembebanan untuk elemen solid adalah 2.486 detik atau sekitar 41 menit dan 26 detik, sementara untuk elemen *surface* selama 1.145 atau sekitar 19 menit dan 5 detik. Dari total alokasi waktu ini, terlihat bahwa elemen *surface* bisa menghemat waktu sebesar sekitar 22 menit dalam pengujian kali ini tanpa harus mengorbankan banyak pada akurasinya.

B. Hasil Pengujian dengan Surface Element

Pengujian *torsional rigidity* ini juga dilakukan dengan ukuran elemen 3.5 mm. Ukuran elemen tersebut didapatkan dari uji konvergensi yang telah dilakukan sebelumnya. Berbeda dengan pengujian sebelumnya yang menggunakan ukuran elemen 4,5 mm yang bertujuan untuk membandingkan langsung dengan hasil yang didapatkan oleh solid elemen dengan spesifikasi elemen yang hampir sama. Pengujian ini bertujuan untuk mengkomparasi hasil penggunaan *surface element* dengan eksperimen Solazzi yang sudah ada.

Gaya vs Deformasi



Gambar 5. Grafik gaya terhadap deformasi dengan ukuran elemen 3,5 mm.

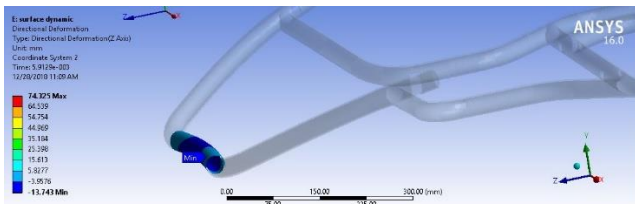
Pada gambar 5. terlihat ketika gaya yang diberikan sebesar 246,80 N, deformasi yang terjadi sebesar 7,8872 mm, sementara ketika gaya yang diberikan semakin besar, seperti 1234,02 N, deformasi yang terjadi sebesar 39,44 mm. Dapat disimpulkan juga gaya yang diberikan berbanding lurus terhadap deformasi yang terjadi terhadap sumbu Y.

Letak deformasi Y maksimum dan minimum dari gaya yang diberikan terjadi pada tumpuan roda depan kanan dan kiri. Hasil kekakuan *chassis* Tony Kart dengan ukuran elemen 3,5 mm mendapatkan hasil *torsional rigidity* sebesar 172,47 Nm/deg. Jika dibandingkan dengan eksperimen Solazzi, perbedaan nilai yang didapatkan sebesar 1,44 %. Nilai perbedaan tersebut lebih kecil jika dibandingkan dengan pengujian sebelumnya yang dilakukan dengan *surface element* maupun *solid element* dengan ukuran elemen 4,5 mm. Sementara nilai perbedaan dengan ukuran 4,5 mm adalah sebesar 3,77%.

Pada pengujian dengan menggunakan ukuran elemen 3.5 mm, juga dicatat waktu yang dibutuhkan dalam proses analisisnya. Proses *meshing* pada ukuran elemen 3.5 mm ini berlangsung selama 18 detik, hal ini lebih memakan waktu dari penggunaan elemen 4,5 mm karena jumlah elemen dan jumlah node yang lebih banyak pada ukuran elemen 3,5 mm. Hal itu berdampak ke waktu total pengerjaan untuk satu kali variasi simulasi sebesar 246 detik atau sekitar 4 menit dan 6 detik. Terdapat 5 variasi dalam satu kali pengujian. Waktu total untuk satu kali pengujian *torsional rigidity* dengan penggunaan elemen 3,5 mm adalah 1.230 detik, atau sekitar 20 menit dan 30 detik, dimana lebih memakan waktu hanya sekitar 1 menit dan 15 detik dari penggunaan ukuran elemen 4,5 mm.

Tabel 5.
Tabel waktu simulasi dengan ukuran elemen 3,5 mm.

	Pre-Processing Time (s)	Proses Meshing (s)	Waktu Simulasi (s)	Total Waktu (s)
Surface (3,5 mm)	189	18	39	246

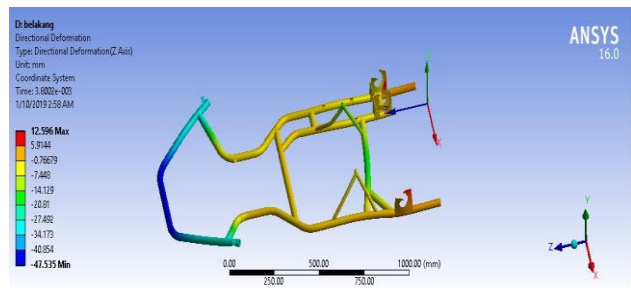


Gambar 6. Bentuk deformasi dari front impact.

C. Hasil Pengujian Impact

Nilai deformasi maksimal dari chassis go-kart ini setelah diuji tabrak depan adalah 13.743 mm. Artinya adalah, bagian paling depan dari chassis go-kart tersebut, mengalami deformasi terhadap sumbu Z sebesar 13.743 mm ke arah belakang. Dimana angka ini terbilang masih aman, karena batas maksimal deformasi yang diizinkan pada chassis go-kart ini adalah 30 mm. Posisi pedal gas dan rem, dimana tempat bersandarnya kaki pengendara berada di jarak 30 mm dari bagian paling depan go-kart tersebut. Hasil menunjukkan bahwa bentuk deformasi ketika terjadi tabrakan dari sisi depan dengan kecepatan maksimal 45 km/h masih bisa dikatakan aman atau tidak melukai pengemudinya. Bentuk deformasinya dapat dilihat pada gambar 6.

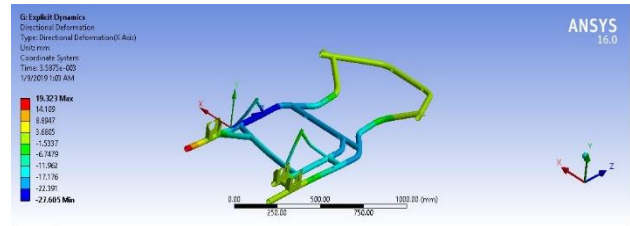
Dari hasil tabrak belakang tersebut, didapatkan nilai deformasi maksimal yang masih tergolong aman, yaitu hanya 12.596 mm saja. Sementara batas nilai deformasi maksimal dari bagian paling luar chassis tersebut adalah 30 mm. Titik aman deformasi hanya dilihat dari bagian paling belakang go-kart saja karena bertujuan untuk melihat bentuk dan nilai pergeseran komponen di daerah tersebut. Apakah pergeserannya dapat melukai pengendara atau tidak. Ternyata dari simulasi yang sudah dilakukan, nilai dan bentuk deformasi tersebut terbilang masih aman untuk bagian belakang chassis go-kart. Pergeseran komponen yang terjadi pun tidak dapat melukai pengemudinya. Dilihat dari bentuk deformasinya pada gambar 7, terlihat tidak mengalami banyak perubahan jika dibandingkan dengan bentuk pada saat sebelum dilakukannya pengujian. Hal ini kemungkinan disebabkan karena bentuk frame bagian belakang yang kokoh dan juga bentuk dari frame bagian belakang yang searah dengan arah gaya yang didapat. Sehingga bentuk dan nilai deformasinya tidak membahayakan bagi pengemudinya.



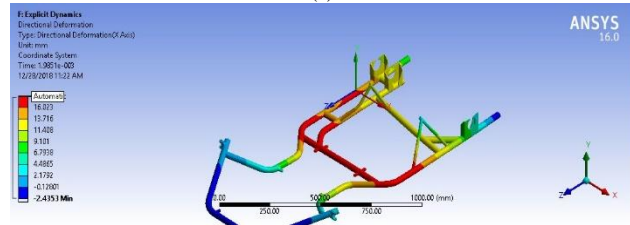
Gambar 7. Bentuk deformasi dari rear impact.

Nilai deformasi pada uji tabrak samping kanan yang didapat dari simulasi sebesar 18,33 mm dan nilai deformasi untuk uji tabrak samping kiri sebesar 27,6 mm. Lalu bentuk deformasi seperti terlihat pada gambar 8 (a) dan (b).

Deformasi maksimal terdapat pada areaudukan mesin gokart tersebut. Hasil tersebut dikategorikan masih aman karena tidak melewati batas deformasi sebesar 30 mm.



(a)



(b)

Gambar 8. Bentuk deformasi uji tabrak samping. (a) kanan ; (b) kiri.

Bentuk dan nilai deformasi yang dihasilkan tidak akan berdampak pada pengendara go-kart. Dampak terbesar pada uji tabrak samping ini ada kepada mesin go-kart yang berada di daerah deformasi maksimal tersebut.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari pengujian ini adalah sebagai berikut :

- 1) Penggunaan *surface element* dengan bentuk elemen *triangle* ukuran elemen 4,5 mm dalam pengujian *torsional rigidity* pada chassis go-kart Tonykart kali ini mendapatkan hasil kekakuan sebesar 166,17 Nm/deg. Sementara pengujian yang sama dilakukan dengan *solid element* mendapatkan hasil kekakuan sebesar 188.61 Nm/deg. Lalu dengan beban maksimal yang diberikan yaitu sebesar 1234,02 N, *surface element* mendapatkan deformasi terhadap sumbu Y sebesar 41,91 mm. Sementara *solid element* mendapatkan hasil sebesar 36,28 mm.
- 2) Pengujian dengan *surface* dan *solid element* kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Solazzi dengan menggunakan chassis go-kart yang sama yaitu Tonykart. Hasil dari eksperimen Solazzi mendapatkan nilai kekakuan go-kart sebesar 175 Nm/deg. Hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan simulasi menggunakan *surface* dan *solid element*. Terdapat perbedaan sebesar 5,1% dengan hasil yang didapat dengan menggunakan *surface element* dengan ukuran 4,5 mm dan 1,44% dengan ukuran elemen 3,5 mm. Sementara terdapat perbedaan 7,8% dengan hasil yang didapat dengan menggunakan *solid element*. Hal ini menyatakan bahwa hasil yang didapat dari penggunaan *surface element* dapat mendekati dari hasil pada kondisi eksperimen. Ini menunjukkan bahwa penggunaan *surface element* dapat digunakan pada permasalahan statis semacam ini, dimana sesuai dengan syarat penggunaan *surface element* yaitu, rasio ketebalan dari geometri yang diuji kurang dari 1.
- 3) Didapatkan deformasi sebesar 13,743 mm pada uji tabrak depan dengan kecepatan maksimal go-kart sebesar 45 km/h. Besar deformasi tersebut dinilai aman karena masih dibawah batasan nilai deformasi sebesar 30 mm. Setelah itu dari uji tabrak belakang, dengan

kecepatan maksimal go-kart sebesar 45 km/h, didapatkan nilai deformasi sebesar 12,59 mm. Hasil ini terbilang aman karena masih dibawah batasan nilai deformasi. Lalu untuk uji tabrak samping, dengan go-kart ditabrak oleh benda dengan kecepatan 30 km/h. Hasil deformasi sebesar 18.33 mm dan 27.6 mm. Hasil tersebut dikategorikan masih aman karena tidak melewati batas deformasi sebesar 30 mm. Setelah melakukan uji tabrak, dapat disimpulkan *chassis* go-kart Tonykart terbilang aman dari tabrakan segala sisi dan deformasi yang terjadi tidak dapat membahayakan atau melukai pengendaranya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. S. Gokhale, S. V Bedekar, and A. N. T. S. Deshpande S., *Practical finite element analysis*. Finite To Infinite, 2008.
- [2] Y. D. S. Wibisana, "Analisis torsional rigidity, efek jacking, dan kekuatan chassis go-kart akibat beban belok," ITS Surabaya, 2018.
- [3] S. Solazzi and M. Matteazzi, *Analisi e sviluppi strutturali di un telaio per kart da competizione*. Parma: AIAS, 2002.
- [4] M. Zaqqi, "Simulasi kekuatan dan torsional rigidity chassis sapuangin speed 3," ITS Surabaya, 2015.
- [5] M. E. Biancolini, B. Riccardo, and R. Luigi, "Integrated multi body/FEM analysis of vehicle dynamic behaviour," University Tor Vergata, 2002.