

ANALISIS KEKUATAN BAN AIRLESS SKUTER ELEKTRIK MENGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD

Muhammad Nauval Varozdaq Rusyaidy¹, Taufik², Tota Pirdo Kasih^{2*}, Alfian Desta Joanda², Eva Novianti³

^{1,2}Program Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Bina Nusantara

³Jurusan Sistem Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada

Jl. Radin Inten II (Terusan Casablanca), Pondok Kelapa, Jakarta Timur 13450

tota.kasih@binus.ac.id

Abstrak

Perkembangan kendaraan ramah lingkungan seperti skuter elektrik semakin diminati, khususnya oleh anak-anak. Namun, masalah pada ban konvensional seperti risiko bocor dan perlunya perawatan tekanan angin mendorong munculnya inovasi ban tanpa udara (airless tire). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan dan kenyamanan ban airless skuter elektrik menggunakan simulasi berbasis Finite Element Method (FEM) melalui perangkat lunak ANSYS Workbench. Dua jenis material spoke diuji: Polyvinyl Chloride (PVC) dan High-Density Polyethylene (HDPE). Hasil simulasi menunjukkan bahwa ban airless dengan spoke dari material PVC menghasilkan defleksi vertikal sebesar 2,56 mm, masih berada dalam batas kenyamanan maksimal sebesar 2,7 mm. Tegangan maksimum pada PVC tercatat sebesar 7,2436 MPa, jauh di bawah batas aman material tersebut. Sementara itu, HDPE mengalami defleksi 4,2 mm, yang melebihi batas kenyamanan, meskipun tegangan maksimumnya masih aman sebesar 6,1006 MPa. Dari hasil ini disimpulkan bahwa material spoke PVC lebih direkomendasikan untuk digunakan dalam desain ban airless skuter anak karena memberikan keseimbangan antara kekuatan dan kenyamanan. Penelitian ini juga menunjukkan potensi desain alternatif dengan biaya lebih ekonomis dibandingkan ban airless komersial.

Kata kunci: ban airless, skuter elektrik, tegangan, defleksi, FEM

Abstract

The development of environmentally friendly vehicles such as electric scooters is increasingly in demand, especially by children. However, problems with conventional tires such as the risk of punctures and the need for air pressure maintenance have encouraged the emergence of airless tire innovations. This study aims to analyze the strength and comfort of airless tires on electric scooters using Finite Element Method (FEM)-based simulations through ANSYS Workbench software. Two types of spoke materials were tested: Polyvinyl Chloride (PVC) and High-Density Polyethylene (HDPE). The simulation results show that airless tires with PVC spokes produce a vertical deflection of 2.56 mm, still within the maximum comfort limit of 2.7 mm. The maximum stress on PVC was recorded at 7.2436 MPa, far below the safe limit for the material. Meanwhile, HDPE experienced a deflection of 4.2 mm, which exceeded the comfort limit, although its maximum stress was still safe at 6.1006 MPa. From these results, it is concluded that PVC spoke material is more recommended for use in the design of airless tires for children's scooters because it provides a balance between strength and comfort. This research also shows the potential for alternative designs that are more cost-effective than commercial airless tires.

Keywords: tire, airless, spoke, tension, deflection

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi dalam sektor transportasi mengalami percepatan yang signifikan, seiring dengan meningkatnya kebutuhan mobilitas masyarakat dan kesadaran terhadap dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh emisi kendaraan bermotor. Hal ini mendorong hadirnya inovasi kendaraan ramah lingkungan, salah satunya skuter listrik [1].

Skuter listrik menjadi solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Kendaraan ini menggunakan motor listrik yang memperoleh daya dari baterai atau media penyimpan energi lainnya. Motor listrik bekerja dengan prinsip elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, yang kemudian digunakan untuk menggerakkan kendaraan. Dalam praktiknya, skuter listrik banyak dimanfaatkan oleh anak-anak sebagai sarana transportasi harian, seperti untuk keperluan pergi dan pulang sekolah [2].

Salah satu komponen vital dalam kendaraan adalah ban. Ban berfungsi untuk menahan beban kendaraan, mentransfer daya dari mesin ke permukaan jalan, meredam getaran, serta mengarahkan laju kendaraan. Semua fungsi ini berkontribusi terhadap kenyamanan dan keselamatan berkendara. Di pasaran, jenis ban yang umum digunakan meliputi ban padat (solid) dan ban radial. Namun, ban pneumatik yang paling banyak digunakan memiliki beberapa kelemahan, seperti mudah bocor, dapat meletus akibat tekanan berlebih, serta memerlukan pengaturan tekanan udara yang presisi untuk menjamin kenyamanan. Selain itu, di medan berlumpur atau becek, ban ini memerlukan jenis khusus agar tidak mudah tergelincir. Kesulitan juga muncul ketika terjadi kebocoran di perjalanan dan sulit menemukan sumber angin [3].

Sebagai alternatif, dikembangkanlah ban tanpa udara atau non-pneumatic tire, yang dikenal juga dengan istilah Tweel. Ban ini tidak mengandalkan tekanan atmosfer dan tidak menggunakan sistem hub konvensional. Teknologi Tweel pertama kali diperkenalkan oleh Michelin pada tahun 2005 sebagai solusi terhadap masalah ban konvensional [4].

Berangkat dari latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi alternatif desain ban airless yang memiliki risiko kerusakan lebih rendah dan cocok untuk skuter anak-anak. Fokus penelitian adalah menganalisis tegangan maksimum yang terjadi pada komponen spoke ban dengan material berbeda. Adapun bagian yang diganti dari ban konvensional adalah bagian dalamnya, dengan mengganti struktur angin menjadi spoke berbahan pipa..

2. LANDASAN TEORI

a. Ban

Ban merupakan komponen dalam kendaraan yang berperan penting dalam keamanan dan kenyamanan berkendara. Fungsi utama ban yaitu menahan beban kendaraan dan penumpangnya, meredam guncangan, menyalurkan tenaga dari drivetrain ke jalan, meneruskan fungsi kemudi yang memengaruhi kemampuan bermanuver kendaraan dan kestabilan saat berkendara [1]

Ban terbagi menjadi jenis berdasarkan bagaimana ban tersebut bekerja. Jenis pertama yaitu ban pneumatik yang bekerja dengan memanfaatkan tekanan udara atau gas di dalamnya, sedangkan jenis kedua yaitu ban non pneumatik yang tidak menggunakan udara. Ban yang beredar di pasaran saat ini ada tiga jenis yaitu ban radial, ban solid, dan juga ban airless [5]. Ban tanpa udara (airless tyre) dirancang sebagai solusi atas berbagai permasalahan yang muncul pada ban radial dan ban padat. Jenis ban ini menawarkan tingkat keamanan dan kenyamanan yang tinggi selama kendaraan beroperasi. Karena tetap dapat digunakan meskipun tertusuk benda tajam, ban ini sering diterapkan pada kendaraan militer.

b. Material Ban

Material ban terdiri dari beberapa material yaitu karet dan Polyurethane (PU). Karet alami adalah polimer isoprena (C_5H_8) yang dapat diperoleh dari pohon karet di Brazil. Karet alam adalah bentuk alami dari 1,4-poliisoprena dan telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi [6].

c. Teori Analisa Struktur

Dalam analisa struktur terdapat defleksi. Definisi Defleksi adalah perubahan bentuk pada suatu benda ditinjau dari 1 dimensi akibat adanya pembebanan yang diberikan pada benda tersebut. Defleksi sendiri dibedakan menjadi 2 yaitu defleksi vertikal dan defleksi lateral [6]

d. Tegangan

Konsep tegangan digunakan untuk menggambarkan beban ketika suatu gaya dikenakan pada area tertentu dari suatu objek. Tegangan diartikan sebagai besarnya gaya internal per satuan luas yang bekerja pada bidang tertentu melalui suatu titik. Secara umum, terdapat dua jenis tegangan yang dapat muncul pada suatu struktur, yaitu tegangan normal dan tegangan geser [7]

e. Regangan

Regangan merupakan ukuran pertambahan panjang relatif terhadap panjang awal suatu benda. Regangan digunakan untuk mengidentifikasi sejauh mana deformasi yang dialami oleh suatu objek [7]. Nilai regangan dihitung dengan membagi perubahan panjang (δ) terhadap panjang mula-mula (L_0).

f. Hubungan Tegangan dan Regangan

Nilai tegangan yang terjadi dipengaruhi oleh karakteristik material itu sendiri [7]. Untuk mengetahui karakteristik suatu material, biasanya dilakukan pengujian tarik terhadap spesimen material tersebut. Pengujian ini umumnya menunjukkan hubungan antara besar gaya tarik yang diberikan dan regangan yang muncul akibat gaya tersebut. Hubungan ini kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik yang dikenal sebagai diagram tegangan-regangan

g. Finite Element Method

Metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) merupakan teknik komputasi yang digunakan untuk menyelesaikan dan menghitung permasalahan kompleks. Metode ini mempermudah analisis terhadap masalah dengan bentuk geometri dan kondisi batas yang rumit, sehingga banyak digunakan di kalangan profesional maupun di dunia pendidikan [8]

h. Referensi Penelitian

Gagasan penggunaan material pipa sebagai jari-jari (spoke) pada ban tanpa udara telah banyak dibahas dalam berbagai forum teknik, baik dalam acara khusus maupun melalui platform digital. Ide ini dinilai memiliki potensi untuk direalisasikan dalam proses produksi dan pemanfaatan nyata. Namun, hingga saat ini belum ditemukan publikasi ilmiah atau jurnal yang secara khusus mengkaji kemungkinan penerapan material pipa pada spoke ban airless. Salah satu referensi yang membahas topik ini berasal dari media asal Inggris, yaitu Driven Media.

Terinspirasi dari Michelin, sebuah media berbasis di Inggris telah merancang dan menguji ban tanpa udara versi mereka sendiri, yang dikembangkan oleh seorang pembalap bersama seorang insinyur mesin. Dalam proyek ini, Driven Media memanfaatkan pelek

baja berukuran 14 inci milik Ford Mondeo, serta 15 batang pipa PVC air tawar yang dipasang di bagian luarnya. Untuk mengurangi getaran, mereka menambahkan pipa kecil anti-getar di sisi luar. Sementara itu, untuk menciptakan daya cengkeram, mereka menggunakan ulir dari ban konvensional yang dibungkuskan ke bagian luar dan disambung di tengahnya [9].

3. METODOLOGI PENELITIAN

a. Penentuan Data Awal

Dalam penentuan data awal perlu menetapkan serta mengumpulkan informasi terkait objek yang akan diteliti. Data yang dikumpulkan berupa ukuran atau dimensi dari ban tanpa udara. Informasi tersebut diperoleh melalui kajian pustaka atau studi literatur.

Tabel 1. Dimensi Komponen

Komponen	Parameter	Nilai (mm)
Pipa	Diameter	26,67
	Tebal	3,17
	Lebar	30,57
Pelek	Diameter	166
	Tebal	49

Tabel 2. Properties Material

Komponen	Material	Density (kg/m ³)	Young Modulus (Mpa)	Poisson Ratio	Allowable Stress (Mpa)
Pipa	PVC	1450	3275	0,38	52
	HDPE	980	1000	0,46	22
Pelek	Aluminium Alloy	2770	71000	0,33	280
	Resin	2250	215000	0,42	97
Epoxy Resin	Hardener	940			

1) Pelek

Pemodelan pelek dibuat dengan ukuran sesuai dengan ukuran pelek skuter sebenarnya yaitu diameter luar 166 mm diameter dalam 122 mm dan lebar pelek 49 mm.



Gambar 1. Tampak Samping Pelek

2) Spoke

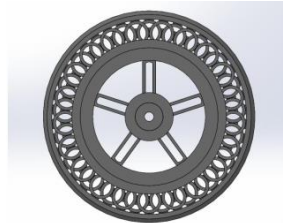
Pemodelan spoke dilakukan dengan meletakkan 21 buah pipa berukuran $\frac{3}{4}$ inch sebanyak 2 baris pada permukaan karet mati



Gambar 2. Tampak Depan Spoke

3) Assembly 3D model

Desain bagian – bagian yang sudah dibuat tersebut lalu disatukan ke dalam satu model *assembly* dan diekspor ke dalam format .step untuk kemudian digunakan sebagai model yang akan disimulasikan.



Gambar 3. Assembly 3D Model

b. **Pemodelan Pembebanan**

Setelah data dan parameter telah ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah memodelkan bentuk fisik dari ban dengan menggunakan perangkat lunak Computer Aided Design (CAD) yaitu SolidWorks yang digunakan dalam penelitian ini.



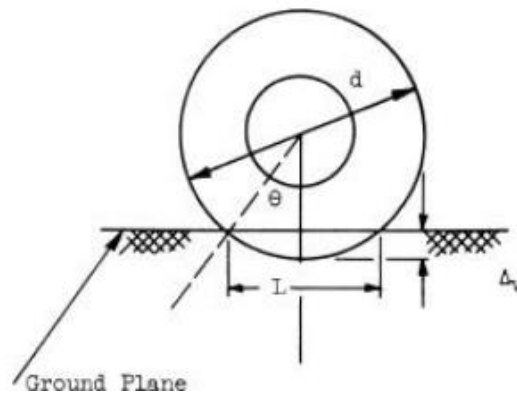
Gambar 4. FBD Skuter

Gaya yang diberikan pada F adalah sebesar 465,9 N, Dimana roda belakang didefinisikan sebagai C dan roda depan didefinisikan sebagai D.

$$\begin{aligned}\sum M_D &= 0 \\ \sum M_D &= (465,9\text{N} \times 278 \text{ mm}) - (F_{y_c} \times 880\text{mm}) + (w \times 440) \\ 880 F_{y_c} &= 135020 \\ F_{y_c} &= 153,4 \text{ N}\end{aligned}$$

c. **Perhitungan Defleksi untuk Acuan Kenyamanan**

Untuk melakukan analisa kenyamanan, perlu dilakukan penelitian mengenai defleksi pada ban yang terjadi. Pada penelitian ini, hasil simulasi dari defleksi yang terjadi pada ban bagian belakang yaitu defleksi vertikal akan dibandingkan dengan perhitungan defleksi yang akan dijabarkan berikut ini.



Gambar 5. Defleksi Vertical pada ban

$$P \cong \pi p_o \nabla v \sqrt{d w}$$

Dimana,

P = beban vertikal = 153,4 N

p_o = tekanan inflasi = 30 psi = 0.21 N/mm²

∇v = defleksi vertikal (mm)

d = diameter luar ban =

227 mm w = lebar ban = 32 mm

$$P \cong \pi p_o \nabla v \sqrt{d w}$$

$$153,4 \cong \pi 0.21 \nabla v \sqrt{227 * 32}$$

$$\nabla v \cong \frac{153,4}{\pi 0.21 \sqrt{227 * 32}}$$

$$\nabla v \cong 2,7 \text{ mm}$$

4. ANALISA DAN PERANCANGAN SISTEM

Setelah dilakukan proses simulasi, pada bab analisa dan pembahasan ini akan dijelaskan mengenai validasi dari hasil perhitungan defleksi pada ban pneumatic dengan hasil simulasi dan eksperimen, kemudian menjelaskan mengenai tegangan dan fatigue yang terjadi pada spoke. Selanjutnya akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dan eksperimen pada ban airless.

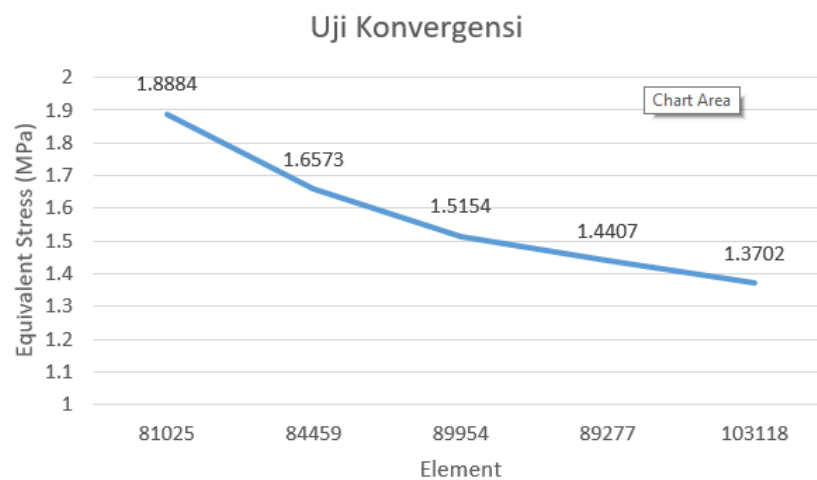
4.1 Hasil Uji Konvergensi

Pada simulasi ban airless uji konvergensi pada analisis menggunakan metode elemen hingga bertujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat dengan jumlah elemen tertentu. Uji konvergensi sendiri dilakukan untuk mengontrol deviasi hasil perhitungan. Pada penelitian ini hasil simulasi bisa dikatakan valid atau error masih dalam batas wajar ketika error dijaga dibawah sepuluh persen. Pada penelitian ini digunakan variasi nilai nodes dan nilai elemen untuk mendapatkan hasil yang konvergen dengan mengambil suatu titik acuan untuk dibandingkan perubahan tegangan yang terjadi terhadap perubahan ukuran elemen. Berikut adalah hasil uji konvergensi pada penelitian ini.

Tabel .3 Hasil Uji Konvergensi

Nodes	Element	Skewness	Equivalent Stress	Error
66792	81025	0.33358	1.8884	
68681	84459	0.32747	1.6573	12%
72189	89954	0.32709	1.5154	8%
74219	89277	0.31396	1.4407	5%
86020	103118	0.28351	1.3702	5%

Pada table 3 hasil yang dijadikan sebagai acuan adalah jumlah nodes dan element adalah sebesar 74219 nodes dan 89277 element karena memiliki error dibawah enam persen. Berikut adalah grafik hasil uji konvergensi.



Gambar 6. Grafik Uji Konvergensi

Gambar 6 merupakan grafik konvergensi dan Equivalent stress terhadap jumlah element. Sumbu x merupakan banyaknya element yang didapatkan tergantung pada ukuran mesh yang diinputkan pada simulasi. Untuk sumbu y merupakan nilai equivalent stress dalam satuan MPA yang menjelaskan besaran tegangan yang dialami oleh model simulasi.

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, dapat terlihat hasil dari equivalent stress dari grafik tersebut mengalami penurunan pada element 81025 sampai 89954 dan mulai stabil pada element 89277. Hal ini mengindikasikan bahwa sudah tidak ada perubahan equivalent stress yang signifikan. Nilai solve time dari simulasi ini stabil dan tidak ada perubahan yang signifikan dengan nilai waktu kurang lebih 4 menit. Hubungan dari jumlah element dengan solve time dan equivalent stress pada penelitian ini yaitu untuk mengetahui jumlah element berapa yang akan digunakan dalam proses simulasi, karena pada proses simulasi semakin banyak element maka nilai equivalent stress akan stabil, akan tetapi nilai solve time akan semakin lama. Didapatlan jumlah elemen sebesar 89277 dengan nilai tegangan 1.4407 MPa digunakan sebagai acuan untuk mendapatkan hasil pada penelitian ini dikarenakan pada jumlah elemen ini dengan nilai error yang terjadi telah berada dibawah 6%.

Pada penelitian ini juga untuk melihat seberapa bagus kualitas meshing, peneliti melihat dari parameter mesh metric yaitu mesh metric skewness. Untuk skewness dapat dikategorikan sesuai dengan gambar 7. Pada penelitian menggunakan banyak element 89277 didapatkan nilai skewness sebesar 0.31396 Berdasarkan uji konvergensi diatas dapat disimpulkan hasil simulasi yang didapatkan yaitu valid.

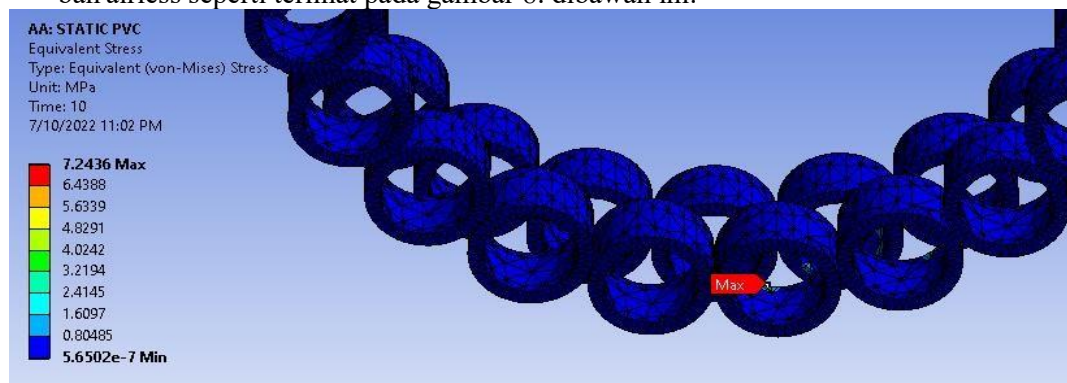


Gambar 7. Skewness mesh metric spectrum.

4.2 Analisa pada Material PVC

4.2.1 Hasil Simulasi Tegangan

Spoke merupakan bagian terpenting dari ban airless sebagai pengganti angin dalam ban pneumatic. Tegangan sendiri dapat menentukan apakah material yang digunakan sudah aman atau tidak ketika diberi beban vertical sebesar 153.4 N. Adapun hasil tegangan pada ban airless seperti terlihat pada gambar 8. dibawah ini.



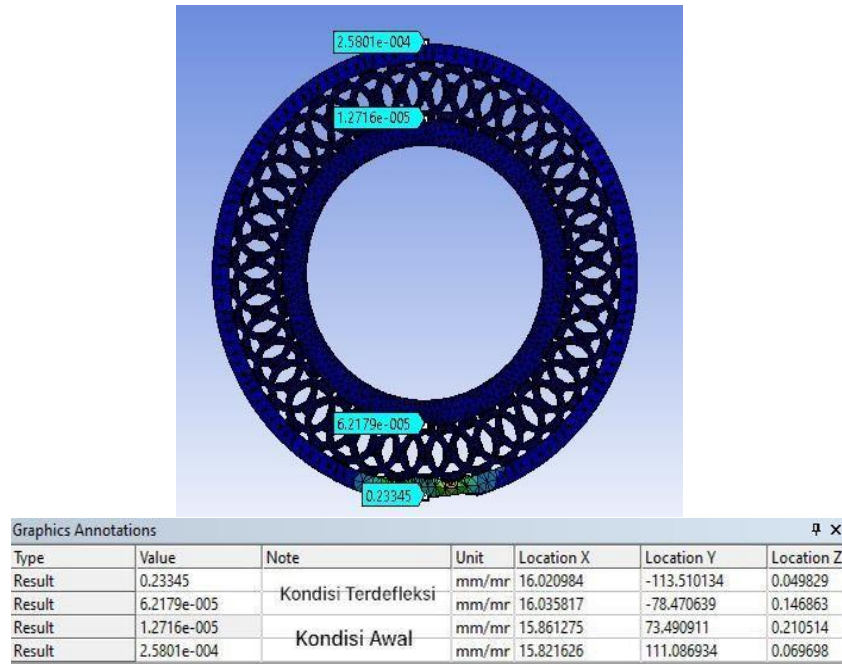
Gambar 8. Tegangan Pada *Spoke* Material *PVC* Ban *airless*

Dari gambar 4.3, didapatkan nilai tegangan maksimum yang diterima spoke bermaterial pvc adalah 7.2436 MPa. Jika dihubungkan dengan teori, maka hasil yang didapatkan telah memenuhi syarat aman yaitu tegangan yang didapatkan harus kurang dari tegangan maksimum yang dapat diterima oleh material yang digunakan. Tegangan yang terjadi jauh dari batas aman material pvc yang sudah diketahui sebesar 52 MPa, dengan berat yang ban yang sama seperti ban pneumatic yaitu 1.2 kg. Ban ini memiliki kelebihan dalam hal ramah lingkungan karena mengurangi emisi karbondioksida, sehingga ban ini masih dapat beroperasi sekalipun terkena benda tajam saat kendaraan beroperasi.

4.2.2 Hasil Simulasi Defleksi

Untuk melakukan parameter kenyamanan saat berkendara, analisa mengenai defleksi yang terjadi pada ban perlu dilakukan. Pada penelitian ini, hasil simulasi dari defleksi yang terjadi pada ban bagian belakang hanya defleksi vertical karena beban yang diberikan hanya beban vertical. Hasil yang didapatkan akan dibandingkan dengan perhitungan dari defleksi vertical supaya diketahui apakah hasil simulasi masuk kedalam batas aman dari defleksi.

Untuk mendapatkan hasil defleksi dari simulasi, peneliti menggunakan solusi equivalent stress dari ANSYS dan kemudian peneliti menggunakan probe pada saat ban dengan kondisi awal dan kondisi setelah terdefleksi. Probe tersebut dapat digunakan untuk melihat seberapa besar defleksi yang terjadi pada ban airless dengan menggunakan material spoke PVC dan material ban hyperelastic. Agar diketahui besaran defleksi yang terjadi peneliti melakukan perhitungan berdasarkan koordinat sumbu y seperti pada gambar.



Gambar 9. Defleksi Ban *airless*

Gambar 9 merupakan hasil penggunaan probe, dapat dilihat berdasarkan pengukuran tersebut, defleksi terbesar yang terjadi menghasilkan tegangan pada ban. Dimana saat ban mengalami tegangan total maksimum maka defleksi yang terjadi juga maksimum. Defleksi ini yang mengakibatkan terjadinya tegangan pada ban, sehingga nilai defleksi maksimum diambil saat ban mengalami tegangan maksimum.

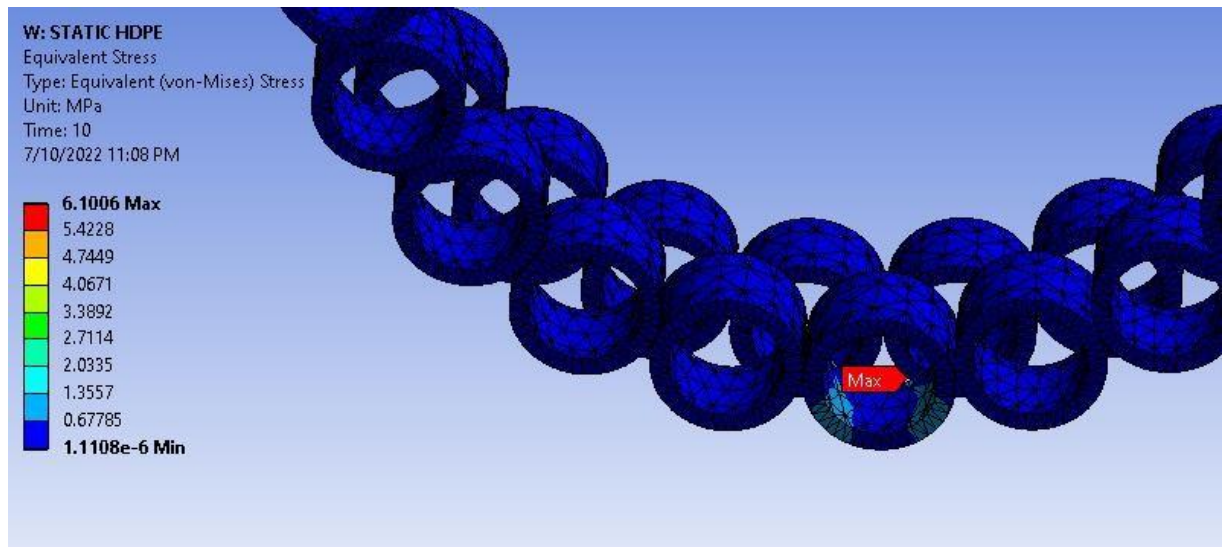
Nilai dari diameter ban saat kondisi awal didapatkan dari selisih probe dengan nilai $111.086 - 73.490 = 37.6$ mm sedangkan nilai pada saat ban terdefleksi didapatkan dari selisih probe dengan nilai koordinat $113.510 - 78.470 = 35.04$ mm. untuk mendapatkan nilai defleksi perlu dilakukan pengurangan antara hasil kondisi awal dengan kondisi terdeformasi, sehingga berdasarkan perhitungan diatas defleksi yang terjadi pada ban *airless* yaitu sebesar 2.56 mm untuk defleksi kearah vertical.

Dapat dilihat berdasarkan pengukuran tersebut, nilai defleksi dengan pembebanan statis pada ban *airless* dengan spoke bermaterial PVC bernilai 2.56mm. Nilai defleksi tersebut lebih kecil dari batas yang ditentukan pada perhitungan ban *pneumatic* yaitu sebesar 2.7mm. Dari nilai tersebut didapat perbedaan nilai sebesar 5% dari hasil perhitungan ban *pneumatic*, dan dari nilai yang dihasilkan sudah cukup mendekati dari nilai defleksi standart ban *pneumatic* yang nyaman digunakan saat berkendara, maka dari itu dari hasil simulasi ini bisa dikatakan nyaman.

4.3 Analisa pada Material HDPE

4.3.1 Hasil Simulasi Tegangan

Spoke merupakan bagian terpenting dari ban *airless* sebagai pengganti angin dalam ban *pneumatic*. Tegangan sendiri dapat menentukan apakah material yang digunakan sudah aman atau tidak ketika diberi beban vertical sebesar 153.4 N. Adapun hasil tegangan pada ban *airless* seperti terlihat pada gambar 10 dibawah ini.



Gambar 10. Tegangan Pada *Spoke* Material *HDPE* Ban *airless*

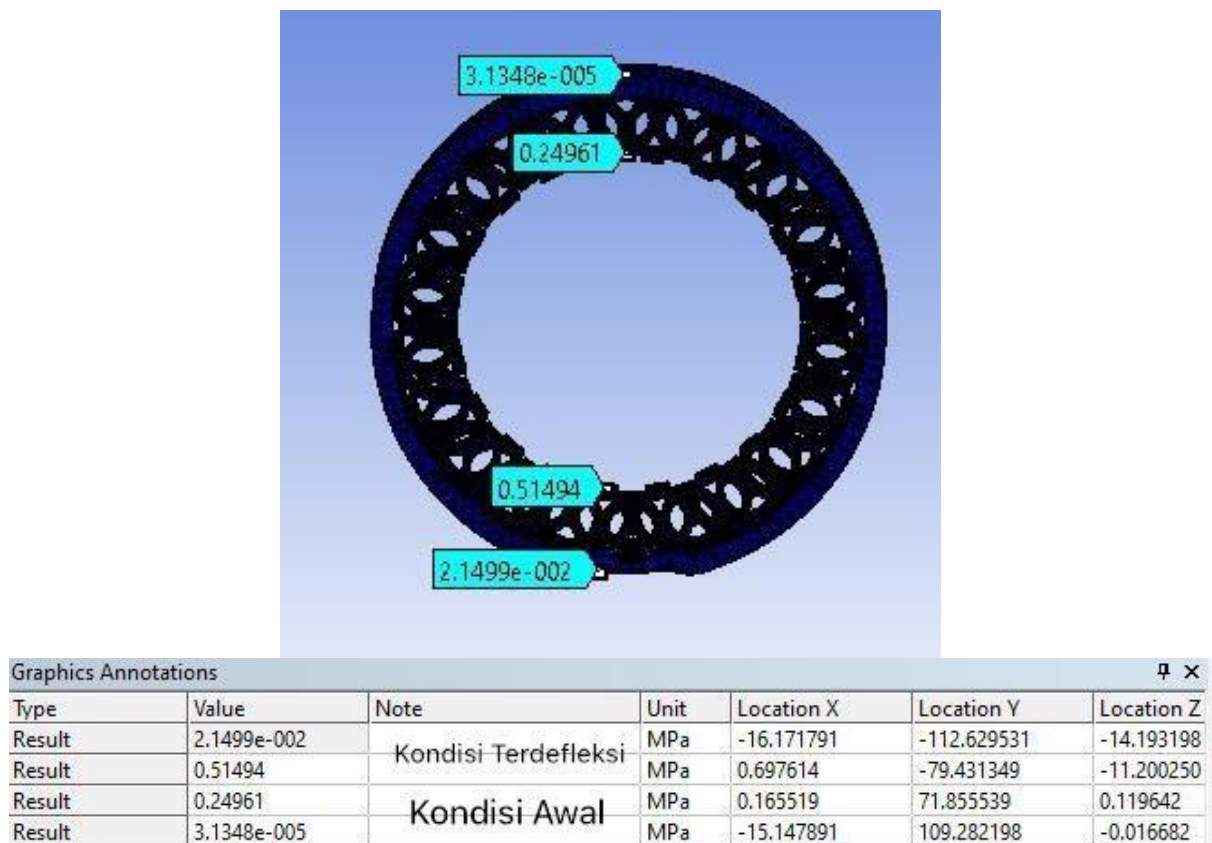
Dari gambar 10, didapatkan nilai tegangan maksimum yang diterima spoke bermaterial pvc adalah 6.1006 MPa. Jika dihubungkan dengan teori, maka hasil yang didapatkan telah memenuhi syarat aman yaitu tegangan yang didapatkan harus kurang dari tegangan maksimum yang dapat diterima oleh material yang digunakan. Tegangan yang terjadi jauh dari batas aman material pvc yang sudah diketahui yaitu sebesar 22 MPa. Sehingga ban ini memiliki kelebihan dalam hal ramah lingkungan karena mengurangi emisi karbondioksida, ban ini juga masih dapat beroperasi sekalipun terkena benda tajam saat kendaraan beroperasi.

Hasil dari simulasi tegangan dari hdpe lebih kecil dari hasil simulasi pvc, hal ini dikarenakan dari physical properties material hdpe lebih elastis dari pada material pvc. Berarti dari simulasi ini sudah sesuai dengan teori Tegangan-Regangan yang ada di sub-bab 2.7 yaitu material yang lebih elastis akan memiliki nilai tegangan yang lebih rendah dikarenakan makin besar nilai modulus elastisitas suatu benda maka makin sulit benda tersebut mengalami perubahan.

4.3.2 Hasil Simulasi Defleksi

Untuk melakukan parameter kenyamanan saat berkendara, analisa mengenai defleksi yang terjadi pada ban perlu dilakukan. Pada penelitian ini, hasil simulasi dari defleksi yang terjadi pada ban bagian belakang hanya defleksi vertical karena beban yang diberikan hanya beban vertical. Hasil yang didapatkan akan dibandingkan dengan perhitungan dari defleksi vertical supaya diketahui apakah hasil simulasi masuk kedalam batas aman dari defleksi.

Untuk mendapatkan hasil defleksi dari simulasi, peneliti menggunakan solusi equivalent stress dari ANSYS dan kemudian peneliti menggunakan probe pada saat ban dengan kondisi awal dan kondisi setelah terdefleksi. Probe tersebut dapat digunakan untuk melihat seberapa besar defleksi yang terjadi pada ban airless dengan menggunakan material spoke PVC dan material ban hyperelastic. Agar diketahui besaran defleksi yang terjadi peneliti melakukan perhitungan berdasarkan koordinat sumbu y seperti pada gambar.



Gambar 11. Defleksi Ban *airless*

Gambar 11. merupakan hasil penggunaan probe, dapat dilihat berdasarkan pengukuran tersebut, defleksi terbesar yang terjadi menghasilkan tegangan pada ban. Dimana saat ban mengalami tegangan total maksimum maka defleksi yang terjadi juga maksimum. Defleksi ini yang mengakibatkan terjadinya tegangan pada ban, sehingga nilai defleksi maksimum diambil saat ban mengalami tegangan maksimum.

Nilai dari diameter ban saat kondisi awal didapatkan dari selisil probe dengan nilai $109.28 - 71.85 = 37.4$ mm sedangkan nilai pada saat ban terdefleksi didapatkan dari selisih probe dengan nilai koordinat $112.63 - 79.43 = 33.2$ mm. untuk mendapatkan nilai defleksi perlu dilakukan pengurangan antara hasil kondisi awal dengan kondisi terdeformasi, sehingga berdasarkan perhitungan diatas defleksi yang terjadi pada ban airless yaitu sebesar 4.2 mm untuk defleksi kearah vertical.

Dapat dilihat berdasarkan pengukuran tersebut, nilai defleksi dengan pembebanan statis pada ban airless dengan spoke bermaterial HDPE bernilai 4.2mm. Nilai defleksi tersebut lebih kecil dari batas yang ditentukan pada perhitungan ban pneumatic yaitu sebesar 2.7mm. Dari nilai tersebut didapat perbedaan nilai sebesar 55% dari hasil perhitungan ban pneumatic. Nilai defleksi lebih besar dari batas maksimum yang telah ditentukan, ketika defleksi yang terjadi lebih besar maka ban dapat menjadi ban mati atau sulit untuk terdefleksi lagi, yang dapat membuat kendali kendaraan terpengaruh dan bila terlalu besar dapat merusak pelek. Dari hasil tersebut berbeda dengan simulasi defleksi sebelumnya dengan material PVC pada sub-sub-bab

4.2.2 yang hasilnya mendekati dari batas maksimum dan bisa dikatakan nyaman, hal ini dikarenakan dari material hdpe itu sendiri lebih elastis dari pada material pvc. Hdpe mempunyai modulus young yang lebih kecil dari pvc yaitu sebesar 1000 MPa sedangkan modulus young pvc sebesar 3275. Berarti hal ini sudah sesuai, dimana material yang lebih elastis akan memiliki nilai defleksi yang lebih besar.

4.4 Analisis Ekonomi

4.3.1 Biaya Produksi *Airless Tire* yang Diajukan dengan Pipa PVC

Tabel 4. Analisis Ekonomi (*juraganmaterial.com*)

Material	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Jumlah
Pipa PVC $\frac{3}{4}$ Inch	1 Meter	Rp. 32.000 / 4 Meter	Rp. 8.000
Resin + Hardener	100 ml	Rp. 55.000 / 1 L	Rp. 5.500
SUB TOTAL			Rp. 13.500
Material	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Jumlah
Pipa HDPE $\frac{3}{4}$ Inch	1 Meter	Rp. 7.400 / 1 Meter	Rp. 7.400
Resin + Hardener	100 ml	Rp. 55.000 / 1 L	Rp. 5.500
SUB TOTAL			Rp. 12.900

Dari perhitungan diatas dapat diketahui bahwa biaya produksi desain ban tanpa angin yang diajukan sangat jauh dibawah ban tanpa angin yang sudah banyak beredar, dimana harga untuk ban airless skuter Xiaomi Mijia M365 Pro adalah sebesar Rp. 350.000. Namun perlu juga menjadi perhatian adalah desain yang diajukan masih dalam tahap usulan yang perlu dilakukan uji eksperimen untuk mendapatkan sudut pandang yang lebih luas terhadap kemungkinan produksi desain ban ini. Dalam analisis ekonomi ini tidak dicantumkan biaya jasa karena ide dalam usulan ini adalah produksi dan penggantian ban dilakukan secara mandiri.

5. Kesimpulan dan Saran

a. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi statik yang dilakukan pada ban airless, diperoleh bahwa material PVC menunjukkan nilai defleksi sebesar 2,56 mm, yang masih berada dalam batas maksimum kenyamanan yaitu 2,7 mm, dengan selisih sebesar 5%. Sementara itu, material HDPE menunjukkan defleksi sebesar 4,2 mm, yang berarti melebihi batas kenyamanan tersebut hingga 55%. Oleh karena itu, dari aspek kenyamanan, penggunaan material PVC sebagai spoke pada ban airless lebih disarankan dibandingkan HDPE. Dari segi keamanan, kedua material masih berada dalam batas tegangan yang aman, yaitu 7,2436 MPa untuk PVC dan 6,1006 MPa untuk HDPE, yang masing-masing masih di bawah nilai *allowable stress* materialnya, yaitu 52 MPa untuk PVC dan 22 MPa untuk HDPE. Selain itu, pada uji eksperimen juga ditemukan bahwa ban airless dengan material PVC mengalami deformasi pada bagian spoke dan defleksi total sebesar 3,25 mm. Hal ini menunjukkan bahwa defleksi pada ban dengan material hyperelastis lebih besar dibandingkan material elastis, memperkuat kesimpulan bahwa material PVC memberikan performa yang lebih optimal dalam menjaga kenyamanan dan kestabilan kendaraan saat digunakan.

b. Saran

Meskipun hasil simulasi dan eksperimen telah memberikan gambaran awal yang menjanjikan terkait desain ban airless, diperlukan penelitian lanjutan yang lebih komprehensif. Desain yang diusulkan dalam penelitian ini masih bersifat konseptual sehingga perlu dilakukan uji eksperimen secara langsung dengan desain yang sama untuk memperoleh data perbandingan yang lebih akurat. Selain itu, disarankan dilakukan pengujian dalam kondisi medan rintangan seperti jalan berlubang atau berlumpur, guna menilai performa ban dalam kondisi penggunaan nyata. Penelitian selanjutnya juga perlu mencakup uji ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue test*) guna mengetahui umur pakai dari masing-masing material sehingga bisa dijadikan pertimbangan dalam proses produksi massal dan komersialisasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Auto2000. *4 fungsi ban mobil yang penting*. Auto2000. <https://auto2000.co.id/berita-dan-tips/fungsi-ban-mobil>. 2020.
- [2] Sihombing, A. Penggunaan skuter elektrik untuk mobilitas anak. “*Jurnal Transportasi Ramah Lingkungan*, 4(1), 22–28”. 2020.
- [3] Hamzah, R., & Sriwijaya, R. A. Analisis masalah pada ban pneumatik kendaraan. “*Jurnal Otomotif Indonesia*, 5(2), 45–53.” 2009.
- [4] JacobMathew, J., Kumar, A., & Patel, R. Tweel: The airless tire innovation by Michelin. “*International Journal of Automotive Engineering*, 4(1), 22–28”. 2016.
- [5] Nyabakken, G. H., & Clark, S. K. Vertical and Lateral Stiffness Characteristics of Aircraft Tires. “*Vertical and Lateral Stiffness Characteristics of Aircraft Tires*, 08, 1–26.” 1969
- [6] Tarachiwin, L., & Tanaka, Y. Recent Advances in Structural Characterization of Natural Rubber. 2009
- [7] Hibbeler, R. C. *Mechanics of Materials* (8th ed.). 2011.
- [8] Hutton. *Fundamentals of Finite Element Analysis*. Fundamentals of Finite Element Analysis. 2004.
- [9] Designboom. 2022. DIY Airless Tires Made of PVC Pipes Bolts and Nuts. <https://www.designboom.com/technology/diy-airless-tires-made-of-pvc-pipes-bolts-and-nuts-03-15-2022/>