

DESAIN DAN ANALISIS VELG MOBIL 15 INCH TIPE ALUMINIUM ALLOY 6061 MELALUI SIMULASI PENGUJIAN *DYNAMIC CORNERING FATIGUE* SESUAI STANDAR SAE J 328

Moh. Nova Ikhsannudin¹, Adhes Gamayel², Mohamad Zaenudin³

^{1,2,3} Jurusan Teknik Mesin, Universitas Global Jakarta

Jl. Boulevard Raya No. 2, Tirtajaya, Sukmajaya, Depok 16412, Jawa Barat, Indonesia

adhes@jgu.ac.id¹

Abstrak

Abstrak Velg adalah bagian roda yang mendapatkan gaya dan tegangan akibat dari menahan berat kendaraan pada posisi diam atau bergerak. Velg memiliki zona kritis terkait gaya dan tegangan pada daerah bernama *spoke*. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan beberapa model velg yang telah dimodifikasi guna mencari nilai kritis yang minimum. Velg yang dilakukan analisis terdiri dari model velg 1 dengan radius *spoke* 4 mm, velg model 2 radius *spoke* 8 mm serta velg model 3 radius *spoke* 12 mm. Metode penelitian dilakukan menggunakan metode *static structural analysis* dengan pendekatan *reverse engineering*. Penelitian dilakukan dalam beberapa tahapan terkait pengujian *dynamic cornering fatigue* dan pemberian beban. Hasil dari pengujian ini dibandingkan dengan standar *Society of Automotif Engineer* (SAE) J 328. Desain velg menggunakan *software Autodesk Inventor 2016* dan disimulasi memakai *software ANSYS Workbench R1 2022*. Hasil dari simulasi berupa nilai *equivalent elastic strain*, *equivalent von misses*, dan *fatigue life* dari ketiga model velg tersebut. Desain velg model 1 mempunyai nilai *equivalent von misses* 75,022 MPa, *equivalent elastic strain* 0,0016627 mm/mm dan nilai *fatigue life* 1.000.000 putaran. Desain velg model 2 mempunyai nilai *equivalent von misses* 119,53 MPa, *equivalent elastic strain* 0,001862 mm/mm serta nilai *fatigue life* 1.000.000 putaran. Desain velg model 3 didapatkan nilai *equivalent von misses* 136,96 MPa, *equivalent elastic strain* 0,0019852 mm/mm dan nilai *fatigue life* 841.040 putaran. Dari semua model velg dilihat dari hasil simulasi dinyatakan memenuhi standart SAE J 328.

Kata kunci : velg, *dynamic cornering fatigue*, *equivalent von misses*, *equivalent elastic strain*, *fatigue life*

Abstract

Abstrak The rim is the part of the wheel that gets the force and tension from holding the vehicle's weight in a stationary or moving position. Wheels have a critical zone related to force and stress in the area called the spoke. This study aims to compare several wheel models that have been modified to find the minimum critical value. The wheels that were analyzed consisted of model 1 wheels with a spoke radius of 4 mm, model 2 wheels with a spoke radius of 8 mm and model 3 wheels with a spoke radius of 12 mm. The research method was carried out using a static structural analysis method with a reverse engineering approach. The research was carried out in several stages related to dynamic cornering fatigue testing and loading. The results of this test are compared with the standard of the Society of Automotive Engineers (SAE) J 328. Wheel design using Autodesk Inventor 2016 software and simulated using ANSYS Workbench R1 2022 software. The results of the simulation are the equivalent elastic strain, equivalent von misses, and fatigue life values of the three-wheel models. Model 1 alloy wheel design has an equivalent von misses value of 75.022 MPa, an equivalent elastic strain of 0.0016627 mm/mm and a fatigue life value of 1,000,000 rounds. The model 2 alloy wheel design has an equivalent von Misses value of 119.53 MPa, an equivalent elastic strain of 0.001862 mm/mm and a fatigue life value of 1,000,000 rounds. The model 3 alloy wheel design obtained an equivalent von misses value of 136.96 MPa, an equivalent elastic strain of 0.0019852 mm/mm and a fatigue life value of 841,040 rounds. Of all the wheel models, seen from the simulation results, they meet the SAE J 328 standard. ditulis dalam Bahasa Inggris, satu paragraf, memuat tujuan, metode penelitian yang digunakan dan hasil.

Key words : *wheels, dynamic cornering fatigue, equivalent von misses, equivalent elastic strain, fatigue.*

PENDAHULUAN

Teknologi pada dunia industri otomotif berkembang begitu pesat. Desain pada satu komponen sering berganti dari segi bentuk dengan cara modifikasi desain atau desain baru. Sehingga perlu ada pertimbangan secara matang mengenai pemilihan material, perhitungan keamanan, dan desain yang baik [1]. Velg merupakan komponen pada kendaraan bermotor yang terus mengalami kemajuan desain dengan keunggulan estetika [2]. Jika velg mengalami kerusakan, akan terjadi potensi bahaya bagi yang mengendarai kendaraan. Hal ini menjadi penting agar desain velg memperhatikan faktor kegagalan ketika digunakan di jalan raya [3]. Velg terdapat 2 tipe yang diketahui di golongan publik adalah velg baja dan velg aluminium [4].

Velg paduan aluminium memiliki wilayah yang dinamakan dengan zona kritis dimana zona kritis itu merupakan wilayah terbentuknya konsentrasi tegangan. Daerah *spoke* merupakan daerah sering terjadinya kerusakan pada velg aluminium paduan akibat menahan gaya dan tegangan melebihi tegangan maksimum yang diijinkan [5]. Selain itu, bagian offset dengan nilai plus dan minus juga termasuk dalam hal yang mempengaruhi kekuatan velg [6]. Penumpukan beban yang berulang-ulang mengakibatkan kerusakan pada komponen sehingga tidak mampu meresap energi atau biasa disebut sebagai *fatigue failure* [7]. Perlu adanya pengujian pada velg terkait *fatigue failure*. Pengujian yang akan dibahas lebih lanjut adalah pengujian *dynamic cornering fatigue* [8].

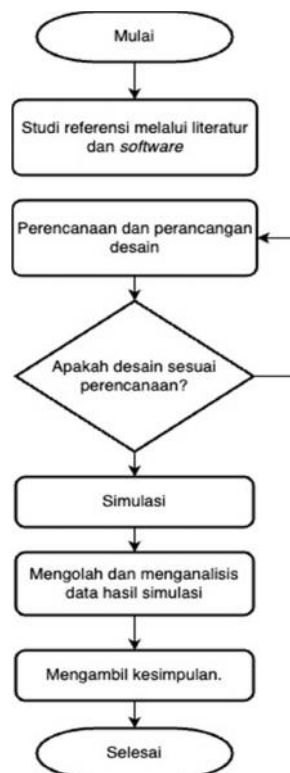
Pengujian *dynamic cornering fatigue* adalah pengujian kelelahan (*fatigue*) pada velg dengan kondisi kendaraan menikung atau berbelok. Standar pengujian ini memakai standar pengujian dan memverifikasi ketahanan *fatigue* dari velg terhadap beban-beban tertentu [8]. Proses pengujian pada velg mempunyai standar pengujian yaitu SAE J 328 [9].

Berdasarkan latar belakang diatas, maka penulis berupaya untuk menganalisa 3 buah velg yang masing-masing memiliki perbedaan radius *spoke*. Desain velg menggunakan *software Autodesk Inventor 2016* dengan material velg yang digunakan adalah tipe aluminium alloy 6061. Proses simulasi pengujian *dynamic cornering fatigue* dengan *software ANSYS Workbench R1 2022* dan menggunakan metode *static structural analysis*. Hasil dari simulasi kemudian dibandingkan dengan

standar pengujian SAE J 328 untuk mengetahui apakah nilai distribusi tegangan (*Equivalent Stress von-misses*), regangan (*Equivalent Elastic Strain*) serta umur *fatigue* berada pada nilai yang dianjurkan.

METODE PENELITIAN

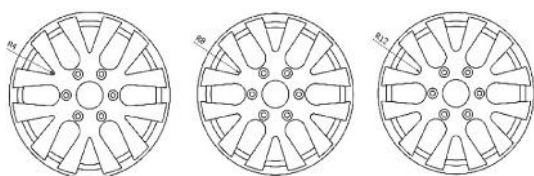
Diagram alir pada penelitian ini disampaikan pada Gambar 1. Diagram alir dibuat sesuai dengan langkah-langkah penelitian yang sudah dilakukan, yaitu agar mampu menggambarkan proses penelitian sedemikian rupa secara setahap demi setahap. Lebih lanjut lagi, aspek pengujian ulang dilakukan pada saat tahap desain, di mana jika desain belum sesuai, maka akan diulang proses desainnya. Lebih lanjut lagi, proses simulasi juga menentukan hasilnya, oleh sebab itu, proses simulasi yang dilakukan pada dasarnya memiliki kerumitannya sendiri, dengan berbagai percobaan *trial and error* sebelum akhirnya data sudah sesuai ketika dibandingkan dengan literatur yang tersedia dan ukuran standar pada SAE J 328.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

1. Pemodelan Variasi Velg Mobil 15 Inch

Pemodelan variasi velg mobil 15-inch dibuat menggunakan perangkat lunak berbasis *computer aided design* (CAD) yaitu *Autodesk Inventor professional 2016*. Software ini memiliki keunggulan seperti proses desain dan pengeditannya mudah, dapat dianimasikan, adaptif, fitur material yang update, dan memiliki kapasitas kecil [10]. Variasi model velg mobil 15-inch terdiri dari velg Model 1 dengan radius *spoke* 4 mm, Model 2 dengan radius *spoke* 8 mm serta Model 3 dengan radius *spoke* sebesar 12 mm seperti pada Gambar 2. Pada tahap ini, variasi ukuran *spoke* pada masing-masing model diduga akan memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada dua variabel dependen, yaitu *equivalent stress* dan *elastic strain*.



Gambar 2 Desain Velg 1, Velg 2 dan Velg 3 dengan variasi berupa ukuran diameter pada *spoke*

2. Data Material

Material yang digunakan pada velg mobil 15-inch yaitu aluminium alloy 6061 dengan nilai *propertis* ditulis pada Tabel 1. Aluminium alloy tipe 6061 merupakan salah satu jenis material yang sudah sering digunakan untuk keperluan velg mobil. Material ini mengandung Al sebesar 96.85%, sementara kandungan elemen lainnya yaitu Mg 0.9%, Si 0.7%, Fe 0.6%, Cu 0.3%, Cr 0.25%, Zn 0.20%, Ti 0.10%, Mn 0.05%, dan 0.05% merupakan elemen-elemen lainnya. Kandungan utama sebesar lebih dari 96% aluminium dan juga dengan adanya tambahan kandungan Cr, maka sifat fisik utama dari logam ini adalah tidak mudah berkarat. Lebih lanjut lagi, kandungan seperti Fe dan Ti memberikan tambahan kekuatan. Dalam banyak kasus, kandungan C pada suatu material mampu memberikan kekuatan yang signifikan, terutama pada paduan-paduan baja yang berbasis Fe. Namun demikian, hal ini berbeda kasusnya pada material paduan berbasis aluminium.

Tabel 1 Data material aluminium alloy 6061

Jenis <i>Properties</i>	Nilai
Densitas	2700 Kg/m ³

Ultimate Tensile Strength	310 MPa
Yield Strength	276 MPa
Modulus of Elasticity	68,9 GPa

3. Meshing

Meshing dilakukan pada desain velg yang telah dibuat. Hal ini bertujuan agar hasil yang didapat menjadi akurat ketika dilakukan perhitungan numerikal pada komputer. *Meshing* menghasilkan nilai elemen dan node yang berbeda disetiap desainnya. Semakin besar jumlah elemen dan node, maka semakin presisi nilai simulasi yang dihasilkan, namun juga berpengaruh pada proses simulasi yang lebih panjang, karena hal ini berarti komputer harus melakukan perhitungan matematis terhadap jumlah node dan elemen yang lebih banyak. Jumlah elemen/node pada desain velg sesuai pada Tabel 2. Jumlah ini dinilai sudah cukup. Pada perangkat lunak yang digunakan, dengan versi *student*, maka jumlah node dan elemen juga dibatasi, sehingga kerincian simulasi juga terbatas.

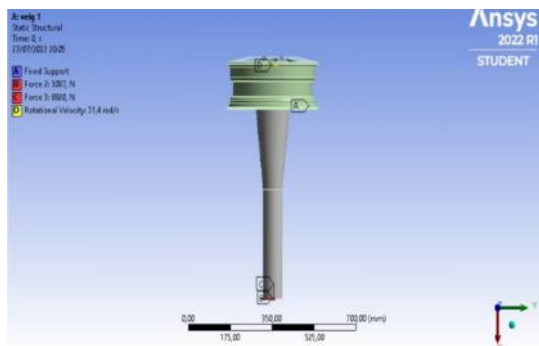
Tabel 2 Jumlah elemen dan node pada model masing-masing variasi velg.

Jumlah Mesh	Velg 1	Velg 2	Velg 3
Node	73270	60258	73804
Elemen	38890	31773	39206

4. Boundary Condition

Penentuan kondisi batas (*Boundary condition*) dilakukan untuk mempermudah proses *running* simulasi pada piranti lunak yang digunakan. Umumnya batasan yang diberikan mendekati dengan kondisi riil agar hasil yang ditampilkan baik dan mampu merepresentasikan keadaan sebenarnya sampai tingkat tertentu. Kondisi batas yang digunakan dalam simulasi pada studi ini yaitu antara lain:

1. *Fix support area flange* velg.
2. Beban akibat gaya gesek antara ban dengan permukaan jalan sebesar 3087 N.
3. Beban akibat berat kendaraan sebesar 8820 N.
4. Pembebanan akibat kecepatan putar sebesar 31,4 rad/s.



Gambar 3 Area pembebanan pada pengujian *dynamic cornering fatigue*.

5. Solution

Solution merupakan tahap terakhir dari proses simulasi. Dalam penelitian ini yang ingin di dapatkan yakni nilai *equivalent stress von mises*, *equivalent elastic strain* serta *fatigue life* [11].

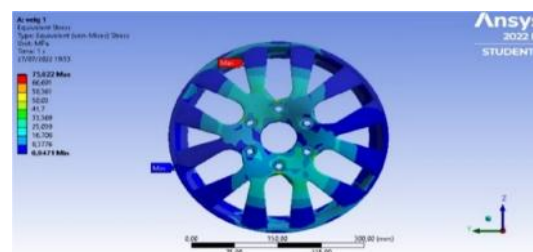
HASIL DAN PEMBAHASAN

Tiga macam beban diberikan pada simulasi *dynamic cornering fatigue* yaitu beban akibat gaya gesek antara ban dengan permukaan jalan, beban akibat berat kendaraan, dan beban akibat kecepatan putar.

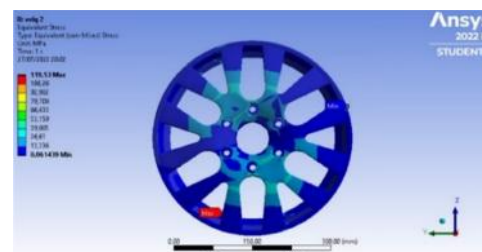
1. Hasil Simulasi *Equivalent Stress* Pada Velg Model 1, 2 dan 3

Berdasarkan simulasi *static structural* pada velg didapat nilai maksimum tegangan *equivalent von Mises* velg Model 1 sebesar 75,022 MPa, Model 2 119,53 MPa, dan Model 3 136,96 MPa. Dari data tersebut diketahui bahwa ketiga model velg mempunyai tegangan dengan nilai dibawah tegangan *yield strength* material. Nilai *yield strength* adalah 276 MPa. Hasil simulasi tegangan *Equivalent von mises* dapat dilihat pada Gambar 4. Perbedaan pada nilai stress hasil simulasi disebabkan oleh perbedaan diameter pada *spoke*. Semakin besar diameter *spoke* sebagaimana pada desain velg, maka akan mempengaruhi ketebalan batang yang menghubungkan antara *disc* dengan *rim*, dimana semakin besar variasi diameter pada *spoke*, maka semakin kecil ukuran batang velg. Hal ini secara sederhana menjelaskan mengapa nilai *equivalent von Mises* stress pada velg Model 1 memiliki nilai terendah (semakin rendah semakin baik) dan velg model ini menjadi model terbaik. Meskin demikian, dalam kaitannya dengan distribusi tegangan,

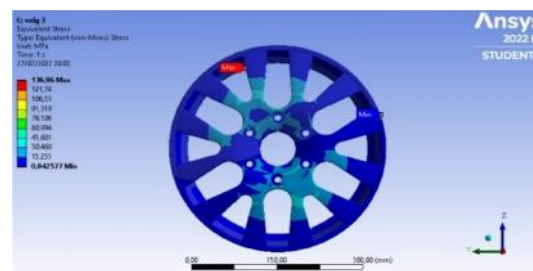
semakin besar diameter pada *spoke* model velg, maka distribusi tegangan cenderung lebih menyebar. Sedangkan, pada diameter *spoke* yang nilainya lebih kecil, distribusi tegangan cenderung terpusat pada bagian area *spoke*, yang membuat nilai tegangan maksimum pada area tertentu menjadi rendah dikarenakan dibagi secara merata. Namun demikian, ketebalan batang velg dalam hal ini ketebalan velg juga memainkan peranan penting, yang pada akhirnya memberikan nilai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan desain yang mengizinkan penyebaran tegangan lebih merata.



(a)



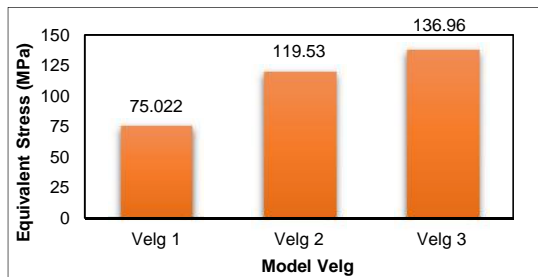
(b)



(c)

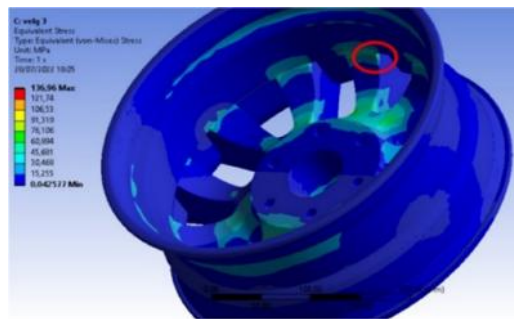
Gambar 4 Hasil Simulasi *equivalent stress* Velg Model 1, 2 dan 3

Dari hasil simulasi dapat dilihat bahwa area yang menuju warna merah memiliki nilai mendekati maksimal dari *equivalent stress*. Area ini berpotensi tinggi menjadi area terjadinya *crack*. Sebaliknya area yang menuju warna biru memiliki nilai mendekati nilai minimal dari *equivalent stress*.



Gambar 5 Hasil grafik simulasi *equivalent stress*.

Berdasarkan grafik gambar 5 diatas diketahui bahwa Velg model 3 memiliki nilai total *equivalent stress* paling tinggi yaitu sebesar 136,96 MPa. Sedangkan velg model 1 sebesar 75,022 MPa dan velg model 2 yaitu sebesar 119,53 MPa. Dapat disimpulkan juga bahwa perbedaan modifikasi radius *spoke* pada velg berbanding lurus dengan hasil pada nilai *equivalent stress*.



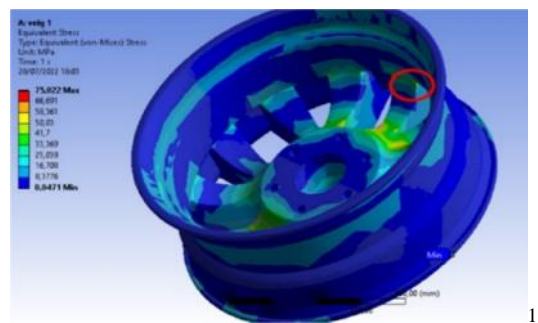
(c)

Gambar 6 Titik rawan pada Velg Model 1, 2 dan 3 (*equivalent stress*)

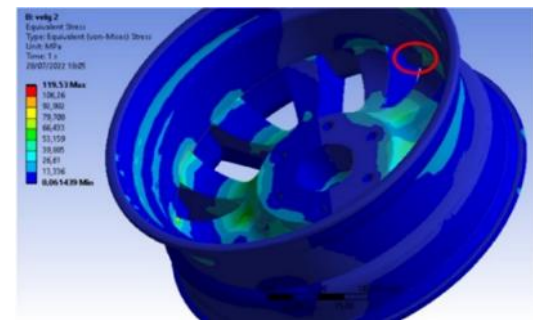
Berdasarkan hasil simulasi tegangan (*equivalent stress*) diketahui bahwa area yang rawan mengalami *crack* pada velg ditunjukkan oleh tanda yang berwarna merah yang terlihat pada Gambar 6.

2. Hasil Simulasi *Equivalent Elastic Strain* Pada Velg 1, 2 dan 3

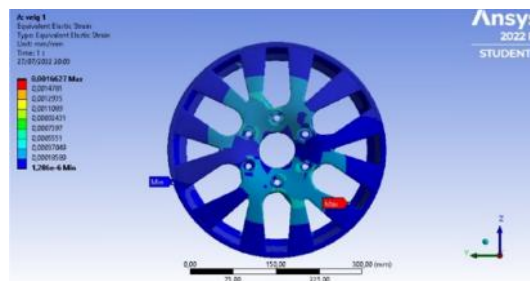
Berdasarkan simulasi *static structural* menggunakan *software ANSYS workbench* versi *student* pada ketiga model velg didapatkan hasil regangan maksimum masing-masing velg, yaitu velg Model 1 memiliki nilai regangan maksimum sebesar 0,0016627 mm/mm untuk Model 2 sebesar 0,001862 mm/mm dan Model 3 sebesar 0,0019852 mm/mm. Untuk data hasil *simulasi static structural* regangan *Equivalent Elastic Strain* dapat dilihat pada Gambar 7a, 7b, dan 7c.



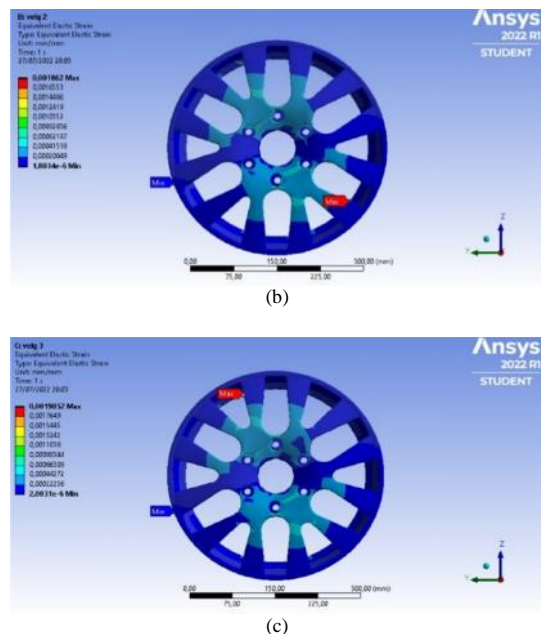
(a)



(b)



(a)

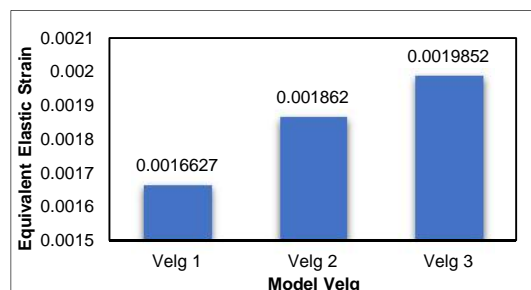


Gambar 7 Hasil simulasi *equivalent elastic strain* Velg Model 1, 2 dan 3

Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa area velg yang warnanya mendekati warna merah memiliki nilai regangan tinggi. Sebaliknya pada area velg yang warnanya mendekati warna biru memiliki nilai regangan yang rendah. Semakin menyebar area regangan, maka semakin bagus desain yang dibuat, yang berarti tegangan yang diakibatkan dari pengujian dapat didistribusikan dengan baik, dan tentunya hal ini juga berpengaruh pada kemungkinan *crack* yang terjadi, terutama jika tegangan terkonsentrasi pada satu titik, yang mana juga akan menyebabkan nilai regangan elastis juga terkonsentrasi. Pada kasus desain velg, jika masih ada pada batas elastis, maka nilai regangan dinilai baik. Namun, jika sudah masuk pada area regangan plastis, maka hal ini dianggap berbahaya, dikarenakan besarnya kemungkinan terjadi *bending* atau *crack* pada model velg.

Berdasarkan grafik pada Gambar 8 diketahui bahwa dari ketiga model velg yang mengalami regangan maksimum paling tinggi nilainya yaitu velg Model 3 dengan nilai total *equivalent elastic strain* paling tinggi sebesar 0,0019852 mm/mm. Jika dibandingkan dengan velg Model 1 yang memiliki nilai regangan maksimum sebesar 0,0016627 mm/mm dan velg Model 2 yaitu sebesar 0,001862 mm/mm. Dapat disimpulkan juga bahwa perbedaan modifikasi area radius *spoke*

mempengaruhi nilai hasil dari simulasi *equivalent elastic strain* semakin lebar radius *spoke* semakin tinggi nilai regangan maksimumnya. Hal ini mengonfirmasi pembahasan yang ada pada pembahasan mengenai tegangan.



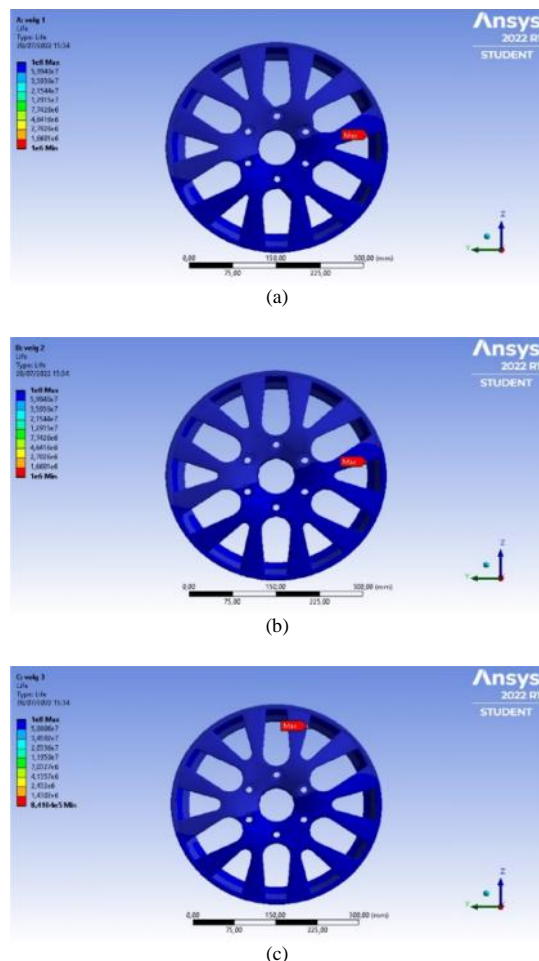
Gambar 8 Hasil Grafik Simulasi *equivalent elastic strain*

3. Hasil Simulasi *Fatigue Life* Pada Velg Model 1, 2 dan 3

Simulasi *fatigue life* pada desain velg Model 1, 2 dan 3 menggunakan standar SAE J 328 dilakukan dengan tujuan untuk menguji apakah model velg yang dihasilkan mampu bertahan selama 500.000 putaran pada pengujian. Pada pengujian ini, jumlah putaran maksimum yang dilakukan pada simulasi yaitu sebagai 1.000.000 kali. Nilai ini dianggap sudah cukup dari batas minimum standar yaitu 500.000. Lebih lanjut lagi, beberapa hal yang berkaitan dengan ketahanan velg juga sudah mampu diambil kesimpulan dengan jumlah maksimum pengujian tersebut. Simulasi akan dihentikan jika sebelum nilai maksimum pengujian didapati kegagalan (*failure*) pada material. Sebaliknya, simulasi akan terus dijalankan hingga mencapai maksimal 1.000.000 putaran, dan akan berhenti meskipun belum ditemukan kegagalan material. Hal ini bertujuan untuk membatasi lama waktu simulasi, yang mana hal ini juga merupakan batasan-batasan yang banyak terjadi pada riset menggunakan metode simulasi.

Berdasarkan simulasi *static structural analysis* menggunakan software ANSYS workbench yang terdapat pada Gambar 9 terhadap ketiga model velg didapatkan hasil nilai *fatigue life* minimum yaitu velg Model 1 memiliki hasil nilai *fatigue life* minimum sebesar 1.000.000 *cycle*, velg Model 2: 1.000.000 *cycle*, dan velg Model 3: 841.040 *cycle*. Untuk area yang mempunyai umur *fatigue* paling rendah terjadi pada daerah area dalam ujung *spoke* velg. Perihal tersebut menunjukkan kalau *spoke* bagian ujung dalam ialah daerah yang rawan terjalin

crack ataupun patah. Berdasarkan hasil simulasi diketahui bahwa dari ketiga model velg dinyatakan aman ataupun lolos uji *Dynamic Cornering Fatigue* karena hasil tersebut melebihi batas dari standar SAE J 328 yang ditetapkan yaitu sebesar 500.000 *cycle*.



Gambar 9 Hasil simulasi *fatigue life* Velg Model 1, 2 dan 3

4. Analisa Perbandingan Ketiga Model Desain Velg 15 Inch

Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan nilai pada standar SAE J 328. Adapun perbandingan hasil ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut. Dapat disimpulkan bahwa hasil desain velg Model 1, 2, dan 3 pada dasarnya masih memenuhi standar SAE J 328. Meskipun modifikasi yang dilakukan pada model velg dinilai kecil, namun

terdapat perbedaan yang signifikan terhadap nilai tegangan maksimum dan *fatigue life* minimum pada tabel tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa masih terdapat ruang untuk optimalisasi terhadap model velg yang sudah ada di pasaran. Namun demikian, beberapa faktor, termasuk faktor kerumitan proses produksi dan *cost* masih menjadi salah satu faktor utama dalam penentuan model suatu velg, bukan hanya pada sisi model saja.

Tabel 3 Perbandingan tegangan maksimum dan *yield strenght* pada masing-masing model velg.

No.	Model velg	Tegangan Maksimum (MPa)	<i>Yield Strength</i> (276 MPa)
1	Radius Spoke Velg 4 mm	75,022	Memenuhi
2	Radius Spoke Velg 8 mm	119,53	Memenuhi
3	Radius Spoke Velg 12 mm	136,96	Memenuhi

Tabel 4 Perbandingan *fatigue life* dengan Standar SAE J-328 pada masing-masing model velg.

No.	Model velg	<i>Fatigue Life</i> Minimum (ribu kali)	Standar SAE J 328 (500.000 Cycle)
1	Radius Spoke Velg 4 mm	1.000	Memenuhi
2	Radius Spoke Velg 8 mm	1.000	Memenuhi
3	Radius Spoke Velg 12 mm	841.04	Memenuhi

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pada velg 1, 2, dan 3 didapatkan kesimpulan bahwa nilai *Yield Strength* dan siklus minimum sudah memenuhi standar SAE J328, yaitu masing-masing 276 MPa dan 5×10^5 . Hasil tegangan, regangan dan *fatigue life*, dapat diurutkan dari desain velg terbaik yaitu velg model 1 nilai tegangan maksimum 75,022 MPa, nilai regangan maksimum 0,0016627 mm/mm dan *fatigue life* minimum 1.000.000 *cycle*, kemudian velg model 2 nilai tegangan maksimum 119,53 MPa, nilai regangan maksimum 0,001862 mm/mm dan *fatigue life* minimum sebesar 1.000.000 *cycle* serta yang terakhir velg model 3 nilai tegangan maksimum 136,96 MPa, nilai regangan maksimum 0,0019852 mm/mm dan *fatigue life* minimum sebesar 841.040 *cycle*. Selain itu, visualisasi hasil simulasi pada ketiga model velg menunjukkan bahwa potensi resiko daerah yang rawan terjalin *crack* ataupun patah dikala akan dilakukan

pengujian *Dynamic Cornering Fatigue* ialah *spoke* bagian ujung dalam pada velg. Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu ditambahkan beban kekencangan baut pada velg saat proses simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. H. Irawan, R. B. S. Majanasastra, and R. H. Rahmanto, "Analisa kekuatan velg cast wheel sepeda motor dengan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga," *J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 2, 2016.
- [2] A. Indrawan, "Simulasi Desain Velg pada Pengujian Dynamic Cornering Fatigue Berdasarkan SAE J 328 dengan Metode Static Structural Analysis," p. 95, 2017.
- [3] A. S. . Chairat and V. Antono, "Rancang bangun metode pembelajaran praktikum cad/cam dengan menggunakan perangkat lunak gratis," *J. Power Plant*, vol. 4, no. 4, pp. 211–217, 2017.
- [4] A. S. Wijianto, M. Mulyadi, and I. Iswanto, "Simulasi Numerik Velg After Market Untuk Mendapatkan Nilai Tegangan dan Deformasi Maksimum," *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur)*, vol. 7, no. 2, pp. 63–68, 2022.
- [5] B. G. Tentua, "ANALISA KELELAHAN VELG RACING TOYOTA AVANSA DENGAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA," *ARIKA*, vol. 09, no. 1, pp. 63–69, 2015.
- [6] F. R. Pris, B. M. Suyitno, and A. Suhadi, "Analisis kekuatan velg aluminium alloy 17 inc dari berbagai desain menggunakan metode finite element analysis (FEA)," *TEKNOBIZ*, vol. 9, no. 2, pp. 33–39, 2017.
- [7] H. R. Dalimunthe et al., "Analisa Pengaruh Jumlah Spoke Dan Ketebalan Flange Terhadap Kekuatan Velg Mobil Berbasis Aluminium," no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [8] K. Simbolon, "Analisa Kampas Rem Dengan Pemodelan Metode Elemen Hingga," vol. 28284, no. 113, p. 28284, 2019.
- [9] M. Bahri and A. S. Pramono, "Analisa Kekuatan Velg Mobil Penumpang pada Simulasi Pengujian Dynamic Radial Fatigue dengan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Its*, vol. 4, no. 1, pp. 1–5, 2015.
- [10] SAE, "Wheels - Passenger Car and Light Truck Performance Requirements and Test Procedures J328 _ 202107," 2021.
- [11] W. Anggono, B. F. Pisa, S. H. Susilo, and M. Engineering, "SUSTAINABLE PRODUCT DESIGN FOR MOTOR CYCLE CAST WHEEL USING FINITE ELEMENT APPLICATION AND PUGH ' S CONCEPT SELECTION METHOD Case Study : Deciding the Optimum Spoke Number of Motor Cycle Cast Wheel," pp. 2–6, 2013.