

**Desain Dan Analisa Thermomekanik Rotor Disc Brake Pada
Kendaraan Electric Scooter**

*Design And Thermomechanic Analysis Of Disc Brake Rotors In Electric
Scooter Vehicles*

Dhovan Ilhamdan Prima¹, Harus Laksana Guntur²

^{1,2}Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

e-mail: dhovanprima@gmail.com¹, Coresepondence Author: haruslg@me.its.ac.id^{2*}

Abstrak

Skuter listrik adalah solusi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar akibat meningkatnya jumlah pengguna sepeda motor dan terbatasnya pasokan bahan bakar fosil. Desain skuter listrik harus mempertimbangkan kinerja, kenyamanan, dan keamanan, dengan sistem pengereman menjadi penting untuk stabilitas dan keselamatan. Analisis termal dan struktural pada berbagai desain cakram rem menggunakan ANSYS menunjukkan bahwa model 3 adalah yang optimal dengan total fluks panas sebesar 1,0576 W/mm², suhu maksimum 126,79°C, tegangan von-Mises maksimum 62,269 MPa, dan deformasi total 0,018962 mm. Analisis kelelahan mengindikasikan bahwa model 3 memiliki kinerja terbaik dengan masa pakai kelelahan 1×10⁷ siklus, kerusakan kelelahan sebesar 100, dan faktor keamanan 1,1788. Simulasi dinamis dengan ABAQUS menunjukkan bahwa model 3 mempertahankan suhu dan distribusi tegangan terendah dan paling stabil selama pengereman pada berbagai kecepatan. Analisis MATLAB SIMULINK menunjukkan bahwa meskipun desain cakram rem baru mempengaruhi jarak dan waktu pengereman, dampaknya tidak signifikan. Pada pengereman LBS, koefisien gesek yang lebih tinggi menghasilkan jarak dan waktu pengereman yang lebih panjang, sedangkan pada pengereman ABS, koefisien gesek yang lebih tinggi menghasilkan jarak dan waktu pengereman yang lebih pendek.

Kata kunci: Analisa Thermomekanik; Disc Brake; Electric Scooter; Pengereman

Abstract

Electric scooters are a solution to reduce fuel consumption due to the increasing number of motorcycle users and the limited supply of fossil fuels. The design of electric scooters must consider performance, comfort, and safety, with braking systems being crucial for stability and safety. Thermal and structural analysis on various brake disc designs using ANSYS showed that model 3 is optimal with a total heat flux of 1.0576 W/mm², maximum temperature of 126.79°C, maximum von-Mises stress of 62.269 MPa, and total deformation of 0.018962 mm. Fatigue analysis indicated that model 3 has the best performance with a fatigue life of 1×10⁷ cycles, fatigue damage of 100, and a safety factor of 1.1788. Dynamic simulations with ABAQUS demonstrated that model 3 maintains the lowest and most stable temperatures and stress distributions during braking at various speeds. MATLAB SIMULINK analysis showed that while the new brake disc design affects braking distance and time, the impact is not

significant. In LBS braking, higher friction coefficients result in longer stopping distances and times, whereas in ABS braking, higher friction coefficients lead to shorter distances and times.

Keywords : *Thermomechanical Analysis; Disc Brake; Electric Scooter; Braking*

1. PENDAHULUAN

Salah satu kebutuhan dasar manusia adalah transportasi. Mobilitas memungkinkan kita untuk memanfaatkan hidup dan segala kemungkinan yang ada. Namun, mobilitas juga memiliki kelemahan, terutama di lingkungan perkotaan, di mana banyak orang menggunakan opsi mobilitas secara bersamaan. Kualitas udara yang buruk, kemacetan lalu lintas, dan kurangnya tempat parkir adalah hasil dari meningkatnya kebutuhan mobilitas. Untuk mengatasi masalah ini tanpa memberlakukan pembatasan ketat pada mobilitas pribadi, alternatif untuk mobil yang menggunakan mesin pembakaran internal diperlukan. Salah satu alternatif tersebut adalah Kendaraan Roda Dua Bertenaga Listrik. (Hardt & Bogenberger, 2019)

Secara umum, salah satu sistem kebutuhan yang diperlukan untuk mengendalikan kendaraan adalah sistem pengereman (Sasikiran et al., 2022). Rem secara luas diklasifikasikan sebagai berikut: pertama menurut sumber penerapan gaya sebagai – rem mekanis, rem hidrolis dan rem pneumatik dan kedua menurut geometri sebagai rem tipe tromol dan rem tipe cakram (Singh Negi et al., 2018). Rem Cakram adalah jenis rem yang menggunakan cakram untuk memperlambat putaran roda dengan cara mendorong bantalan rem ke cakram dengan satu set kaliper yang mengubah energi kinetik tromol yang berputar menjadi panas. Bahan yang digunakan untuk pembuatan rem biasanya adalah gray cast iron, yang memiliki sifat keausan dan gesekan yang baik. Cakram rem (atau rotor rem), dipasang pada poros, berputar pada kecepatan yang sama dengan kecepatan roda. Bantalan rem ditempatkan di samping cakram rem dan bersentuhan saat sistem menekan bantalan rem ke rotor (Manjunath & Kumar N, 2019). Saat rem diterapkan, gesekan bantalan rem pada permukaan rotor menghasilkan panas yang sangat besar, dan jika suhu melebihi nilai kritis bahan yang diberikan, ini dapat menyebabkan pengereman menjadi kurang efektif dan terjadi kegagalan pengereman (Sarkar, 2013).

Menanggapi masalah di atas, peneliti dalam dan luar negeri telah melakukan banyak penelitian tentang bentuk dan distribusi struktur geometri cakram rem, dan merancang dan memverifikasi efek pengereman dari berbagai bentuk struktur permukaan cakram rem. Vishvajeet, dkk melakukan penelitian menggunakan analisis elemen hingga untuk membandingkan performa termo-mekanik dari empat bahan rem cakram (Karbon, Aluminium, Besi tahan karat, dan Paduan titanium) berdasarkan deformasi, tegangan, dan perilaku termal. Hasilnya menunjukkan bahwa semua bahan aman digunakan, namun bahan karbon, besi tahan karat, dan paduan titanium lebih unggul dalam penurunan suhu (Vishvajeet et al., 2021). Mit Patel dkk menggunakan optimasi topologi dan metode Taguchi untuk menganalisis perilaku termo-mekanis serta mengoptimalkan berat rotor cakram rem dengan membuat lubang-lubang di permukaan dengan menggunakan software MINITAB. mereka menentukan bahwa kombinasi parameter terbaik adalah terdapat pada salah satu set, yang memberikan nilai stres dan berat minimum di antara semua set eksperimen (Patel et al., 2019). Ali Belhocine dan Mostefa Bouchetara menggunakan ANSYS untuk menganalisis rem cakram penuh dan berventilasi, menunjukkan ventilasi radial sangat efektif dalam pendinginan cakram, dan faktor seperti desain, jumlah elemen, langkah waktu, jenis bahan, dan mode pengereman mempengaruhi distribusi suhu (Belhocine & Bouchetara, 2012). Penelitian M.A. Maleque mengembangkan metode pemilihan material untuk cakram rem

otomotif, menggunakan metode biaya per unit properti dan logika digital untuk mengevaluasi besi tuang, paduan aluminium, paduan titanium, keramik, dan komposit. Hasilnya menunjukkan bahwa AMC 2 (paduan Al-Cu diperkuat dengan 20% SiC) memiliki indeks kinerja tertinggi, diikuti oleh besi cor kelabu (GCI) (Maleque et al., 2010).

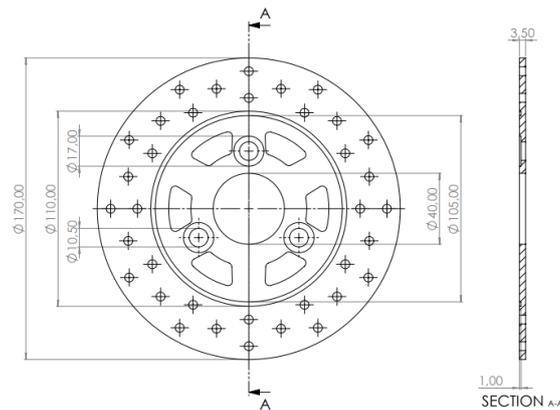
Zhang dkk melakukan menganalisis cakram rem Q345b dengan model analisis elemen hingga termo-mekanis. Model kopling termo-mekanis cakram rem dan bantalan dibuat menggunakan perangkat lunak Abaqus untuk mendapatkan suhu dan tegangan cakram rem. Kemudian, umur inisiasi retak permukaan dihitung dengan perangkat lunak fe-safe, dan umur pertumbuhan retak dihitung dengan perangkat lunak nCode. Hasil menunjukkan retak lelah muncul di sisi luar permukaan gesekan cakram rem. Umur inisiasi retak adalah 12.830 kali pengereman, dan umur propagasi retak adalah 695.000 kali pengereman (Zhang et al., 2019). Swastik pradhan dkk menganalisis berbagai material cakram rem untuk strain, tegangan, tegangan geser, deformasi, suhu, dan fluks panas. Hasilnya menunjukkan bahwa baja struktural memiliki strain terendah, aluminium memiliki tegangan terendah, dan tembaga memiliki tegangan geser terendah, sementara baja tahan karat dan besi cor abu-abu menunjukkan kinerja rata-rata yang baik meskipun baja tahan karat lebih rentan terhadap korosi (Pradhan et al., 2022). Mulukanuru dan hariharan melakukan penelitian menyelidiki suhu dan struktur rem cakram padat selama pengereman pendek dan darurat menggunakan besi tempa, baja tuang, aluminium, dan plastik yang diperkuat serat karbon, serta mengubah lubang cakram untuk mengamati pelepasan panas, tegangan, regangan, dan deformasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa polimer yang diperkuat serat karbon adalah material terbaik untuk rem cakram karena aman, ringan, dan cocok untuk kendaraan sport (Hariharan & Bhavani, 2015).

Anuja mary dkk membuat model matematika dari sistem ABS disimulasikan berdasarkan pengendali Bang-Bang. Kinerja pengereman kendaraan dengan dan tanpa pengendali Bang-Bang dibandingkan dan dianalisis. Hasil simulasi menyimpulkan bahwa pengendali Bang-Bang memiliki kinerja pengereman yang lebih baik karena mengontrol kecepatan roda dan kendaraan secara bersamaan, sehingga menghindari kendaraan tergelincir saat pengereman mendadak (Mary, 2020). Dileepan Anandan dan Pruthvi Krishnamurthy melakukan penelitian dengan mengoptimalkan waktu desain untuk menghitung jarak berhenti kendaraan secara akurat menggunakan model Simulink dan memverifikasinya secara fisik dengan deselerometer. Hasilnya menunjukkan bahwa perhitungan jarak berhenti menggunakan model Simulink hampir sama dengan pengukuran praktis (Anandan & Krishnamurthy, 2020).

Dari uraian diatas maka dilakukan penelitian ini. Pada penelitian ini akan diusulkan desain cakram rem baru untuk elektrik scooter, menyelidiki, dan menganalisis perilaku termo-mekanis dari profil cakram rem yang diusulkan serta analisa performansinya.

2. METODE

Jenis penelitian ini adalah studi simulasi menggunakan software CAE. Jenis penelitian ini adalah studi simulasi menggunakan software CAE. Tahapan penelitian dimulai dengan study literature dan pengumpulan data penelitian untuk menentukan variabel dan parameter penelitian. Kendaraan electric scooter ECGO 2 digunakan sebagai objek penelitian pada penelitian ini. Berikut merupakan model cakram rem yang digunakan sebagai referensi pemodelan cakram rem. Perancangan rotor rem cakram berventilasi pilar dilakukan menggunakan SOLIDWORKS 2019 sesuai dengan dimensi standar. Satu-satunya variasi di setiap desain rotor adalah profil cakram rem. Semua dimensi lain tidak diubah untuk melakukan perbandingan terbaik antara rotor rem cakram. Jari-jari efektif dan ketebalan rotor dijaga tetap sama untuk menghindari perubahan torsi pengereman.



Gambar 1. Dimensi Cakram Rem Referensi

Untuk melakukan perhitungan dan analisa, pengetahuan mengenai data spesifikasi dari kendaraan uji sangat diperlukan. Adapun spesifikasi dari kendaraan yang menjadi objek dalam penelitian sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Kendaraan ECGO 2

Dimensions	
Length	1635 mm
Width	715 mm
Height	1168 mm
Wheelbase	695 mm
COG Distance to Front Wheel Axle (Lf)	473 mm
COG Distance to Ground (h)	196 mm
Vehicle Mass	
Total Mass (M)	63 kg
Front Mass (Mf)	25,5 kg
Rear Mass (Mr)	37,5 kg
Aerodynamic	
Frontal Area (Af)	0,55
Wind Density (ρ)	1,23 Kg/m ³
Drag Coefficient (Cd)	1,8
Rolling Coefficient (Cr)	0,02
Adhesion Coefficient (μ_s)	0,8
Brake Dimensions	
Pedal to Fulcrum Distance (a)	0,175 m
Push Rod to Fulcrum Distance (b)	0,025 m
Master Cylinder Diameter	0,011 m
Disc Brake Model	
Caliper Piston Diameter	0,034 m
Rotor Disc Diameter	0,17 m
Brake Friction Coefficient	0,3
Front Tires 10 x 2.75 inches	
Type	Radial
Wheel Diameter	254 mm
Width	69,85 mm

Berbagai bahan digunakan untuk rem cakram seperti besi tuang abu-abu dan baja tahan karat, yang memiliki kekuatan luluh tinggi namun berat. Untuk optimasi kekuatan dan ringan, aluminium dipilih karena densitas lebih rendah dan kekuatan luluh baik. Aluminium juga mudah didapatkan di Indonesia dan relatif murah. Berikut adalah sifat material aluminium dan kampas rem yang akan digunakan dalam uji simulasi.

Tabel 2. Material Property Cakram Rem

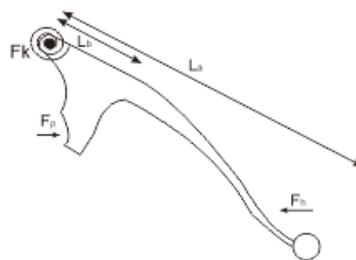
Property	Satuan	Aluminium Alloy
Density	Kg/m ³	2810
Elastic modulus	Pa	7.2e+10
Yield strength	Pa	5.1e+8
Poisson's ratio	-	0.33
Thermal conductivity	W/mK	130
Specific heat	J/KgK	960

Tabel 3. Material Property Kampas Rem

Property	Satuan	Asbestos
Density	Kg/m ³	2500
Elastic modulus	Pa	1,65e+11
Yield strength	Pa	3,14e+9
Poisson's ratio	-	0.34
Thermal conductivity	W/mK	1,46
Specific heat	J/KgK	1907

Sistem Pengereman dan Persamaan yang Berlaku Didalamnya

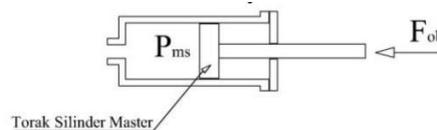
Handle Rem mendapat gaya dari genggam tangan pengemudi. Sehingga dapat dihitung besar gaya yang dihasilkan dari handle rem yaitu:



Gambar 2. Skematik Tuas Rem

$$F_{out} = \frac{F_p L_a}{L_b \sin \theta} - F_k \tag{1}$$

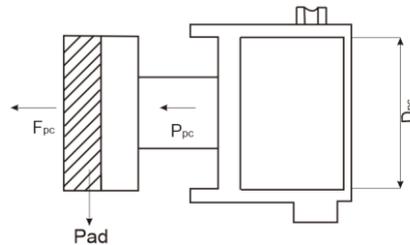
Gaya yang dihasilkan dari tekanan handle rem akan diteruskan ke master silinder. Berikut gaya yang dihasilkan dalam master silinder:



Gambar 3. Skematik Master Silinder

$$P_{ms} = \frac{F_{out}}{0.25 \times \pi \times D_{ms}^2} \tag{2}$$

Kaliper yang mendapat tekanan dari master silinder kemudian bergerak mendorong pad yang nantinya akan bergesekan dengan piringan cakram. Skematik dari gaya yang terjadi pada kaliper ditunjukkan pada gambar dibawah. Berikut adalah perhitungan besar gaya pada kaliper:



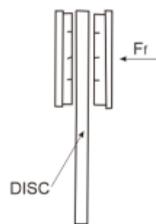
Gambar 4. Skematik Kaliper Rem

$$P_{ms} = P_{pc} \quad (3)$$

$$F_{pc} = P_{pc} \times A_{pc} \quad (4)$$

$$F_{pc} = P_{pc} \times 0.25 \times \pi \times D_{pc}^2 \quad (5)$$

Gaya gesek pengereman terjadi ketika pad bergesekan dengan piringan cakram sebagaimana ditunjukkan pada gambar dibawah. Berikut adalah perhitungan gaya gesek pengereman yang terjadi:



Gambar 5. Skematik Gaya Gesek Pengereman

$$F_f = F_{pc} \times \mu_d \quad (6)$$

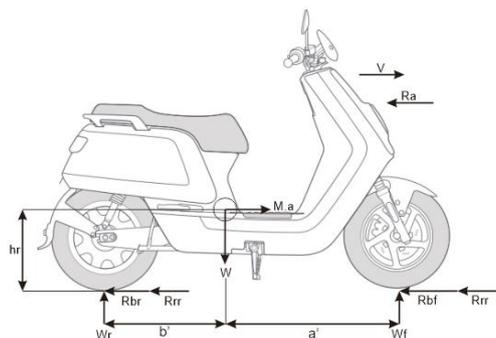
Rumus ini kemudian dapat diperluas dengan mempertimbangkan pengaruh suhu pada koefisien gesek:

$$F_f = F_{pc} \times \mu_d(T) \quad (7)$$

Koefisien gesek dianggap berubah linier dengan suhu, bisa dinyatakan dalam bentuk sederhana:

$$\mu_d(T) = \mu_d0(1 - k(T - T0)) \quad (8)$$

Pemodelan dinamis kendaraan merupakan salah satu pemodelan matematis yang menganalisa gaya-gaya kendaraan pada saat pengereman. Gambar berikut menunjukkan gaya - gaya yang bekerja pada kendaraan.



Gambar 6. Free Body Diagram Kendaraan

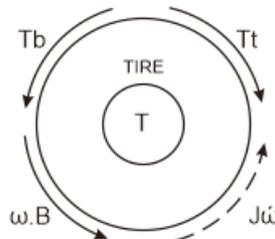
Hukum Newton

$$\sum F = m \times a \tag{9}$$

$$R_b + R_r + R_a = m \times a \tag{10}$$

$$a = \frac{R_b + R_r + R_a}{m} \tag{11}$$

Pemodelan matematis kendaraan dan roda akan dijadikan acuan untuk menyusun pemodelan diagram blok simulasi. Gambar dibawah memperlihatkan free body diagram roda.



Gambar 7. Free Body Diagram Roda

Persamaan Kecepatan Angular

$$J\ddot{\theta} = -T_b + T_t - \omega.B \tag{12}$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-T_b + T_t - \omega.B}{J} \tag{13}$$

Panas yang dihasilkan saat menerapkan aksi pengereman pada rem cakram (heat generated) = energi kinetic, sehingga:

$$Ke = \frac{(MxV^2)}{2} \tag{14}$$

Selanjutnya adalah menghitung besaran heat flux atau laju aliran panas, asumsi 70% energy pada roda depan, sehingga didapatkan persamaan:

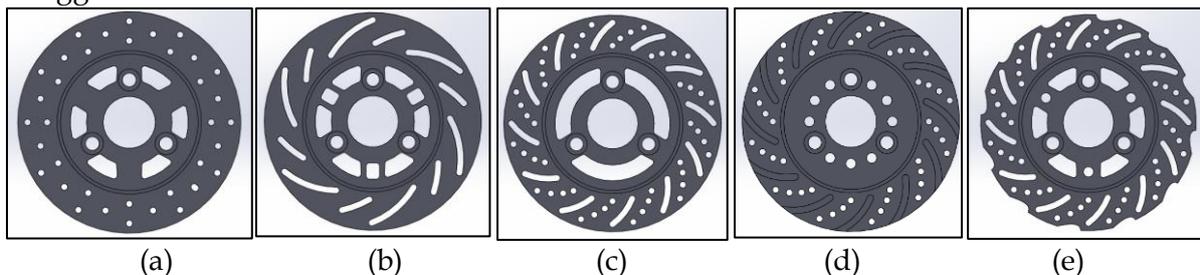
$$Heat\ Flux(Q) = \frac{Heat\ Generated \times 0.7}{stopping\ time \times swept\ area\ disc \times 2} \tag{15}$$

Kemudian, film coefficient dapat dihitung dengan persamaan:

$$Film\ coefficient\ (h) = \frac{Q}{\Delta t} \tag{16}$$

Analisa Statis

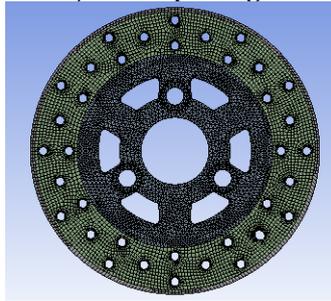
Pembuatan geometri merupakan tahapan pre-processing sebelum dilakukan processing. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan bentuk profil pada cakram rem. Variabel yang lain dari desain dijaga pada kondisi tetap sesuai standar desain referensi. Pembuatan menggunakan software solidworks 2019.



Gambar 8. Variasi Rotor Disc Brake, (a) Desain Referensi, (b) Desain 1, (c) Desain 2, (d) Desain 3, (e) Desain 4

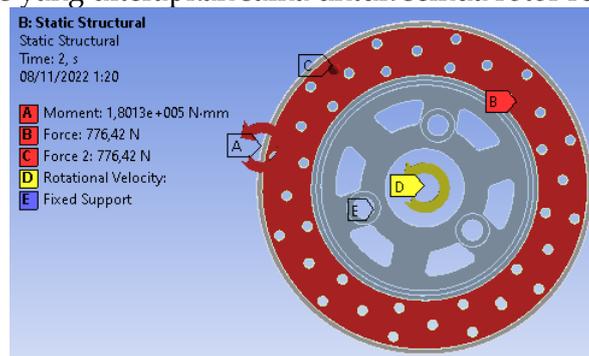
Model CAD dari rotor rem cakram yang dirancang menggunakan SOLIDWORKS 2019 diimpor ke meja kerja ANSYS. Langkah terpenting dalam preprocessing FEA adalah

diskritisasi. Diskritisasi dilakukan dengan menggunakan meshing. Detail meshing yang dilakukan pada rotor rem cakram ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



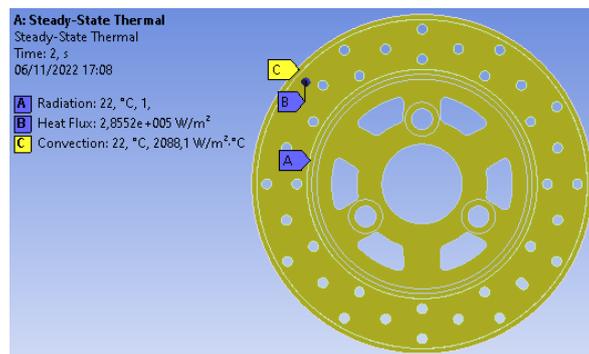
Gambar 9. Proses Meshing

Parameter-parameter yang telah ditetapkan untuk domain simulasi akan diolah secara numerik. Daerah di mana kondisi batas diterapkan pada model ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Kondisi batas yang diterapkan sama untuk semua rotor rem cakram.



Gambar 10. Kondisi Batas Analisa Statis Struktural

Kondisi batas untuk analisis termal statis telah diterapkan seperti yang ditunjukkan pada gambar.

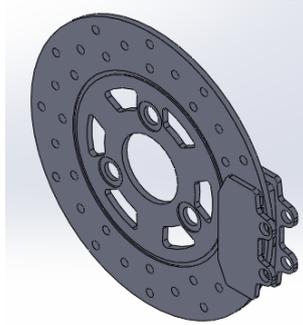


Gambar 11. Kondisi Batas Analisa Statis Termal

Setelah melakukan berbagai proses, akan didapatkan data hasil pengujiannya yang akan digunakan untuk analisa data dan pembahasan sesuai dengan teori yang ada. Dari analisa data dan pembahasan yang dilakukan, dapat diketahui nilai akhir untuk deformasi total, tegangan ekuivalen (von-Mises), distribusi temperatur, dan fluks panas total.

Analisa Dinamis

Tahap - tahap yang dilaksanakan pada saat Analisa dinamis dimulai dengan pembuatan geometri pada software solidwork 2019, setelah itu dilakukan import part ke software Abaqus dan pemberian material properties.



Gambar 12. Geometri Disc Brake dan Kampas Rem

Pada tahap lainnya terdiri dari penggabungan part kampas rem dan disk rem menjadi satu kesatuan, penentuan interaksi yang diinginkan dari kampas rem dan disk, input load yang mendefinisikan beban dan boundary condition, serta proses meshing. Detail meshing yang dilakukan pada rotor rem cakram ditunjukkan pada gambar di bawah.



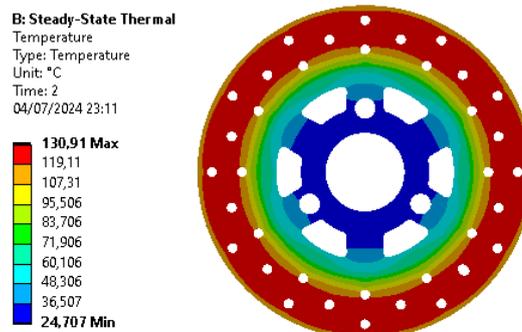
Gambar 13. Meshing Abaqus

Setelah semua prosedur telah dilakukan selanjutnya dilakukan pemberian job dan visualization proses simulasi untuk menentukan hasil dari proses pengereman yang telah diberi pembebanan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisa Statis

Hasil dari simulasi steady state thermal untuk berbagai variasi disc brake adalah sebagai berikut.



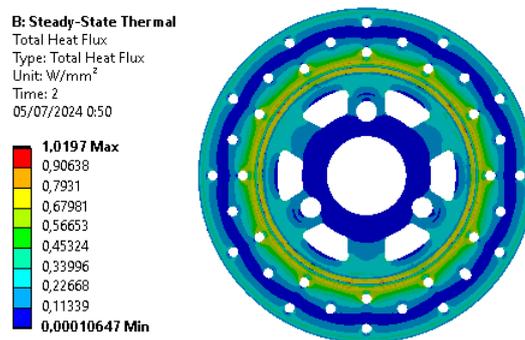
Gambar 14. Plot Kontur Temperature Cakram Rem Pada Desain Referensi

Gambar diatas merupakan hasil simulasi analisa statis berupa temperature pada desain referensi, untuk memudahkan perbandingan hasil dari simulasi termal, nilai temperature dari kelima desain disajikan pada tabel dibawah:

Tabel 4. Nilai Temperature Analisa Statis Variasi Cakram Rem

No.	Variasi Desain	Temperature (°C)	
		Maksimal	Minimal
1.	Desain Referensi	130,91	24,707
2.	Desain 1	131,65	24,278
3.	Desain 2	141,64	22,71
4.	Desain 3	122,95	25,298
5.	Desain 4	147,91	24,862

Hasil distribusi temperatur setelah pengereman menunjukkan bahwa gesekan bantalan rem menghasilkan panas tertinggi di area kontak dengan rotor. Temperatur paling rendah berada di bagian dalam rotor dekat baut roda, karena lebih jauh dari area gesekan utama. Membandingkan nilai temperature dari berbagai desain menunjukkan desain cakram 3 paling efektif dalam menghilangkan panas, karena memiliki suhu tertinggi paling rendah setelah pengereman. suhu tertinggi 122,95°C dan terendah 25,298°C.



Gambar 15. Plot Kontur Total Heat Flux Cakram Rem Pada Desain Referensi

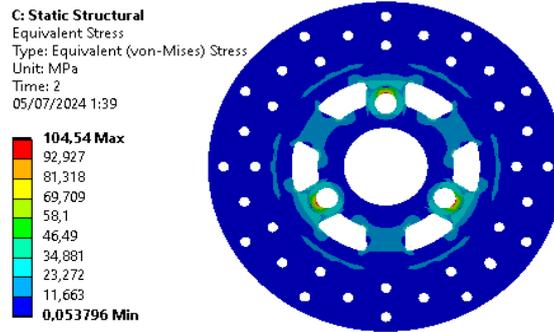
Gambar diatas merupakan hasil simulasi analisa statis berupa total heat flux pada desain referensi, untuk memudahkan perbandingan hasil dari simulasi termal, nilai total heat flux dari kelima desain disajikan pada tabel dibawah:

Tabel 5. Nilai Total Heat Flux Analisa Statis Variasi Cakram Rem

No.	Variasi Desain	Total Heat Flux (W/mm ²)	
		Maksimal	Minimal
1.	Desain Referensi	1,0197	0,00010647
2.	Desain 1	1,2075	5,4151e-5
3.	Desain 2	1,2123	1,5012e-5
4.	Desain 3	1,0178	9,6915e-6
5.	Desain 4	1,239	0,0001679

Desain ke-3 menunjukkan hasil terbaik dalam hal fluks panas, mencatat nilai fluks panas terendah setelah penerapan rem, memungkinkan pembuangan panas yang lebih baik karena bertambahnya alur. Fitur desain ini menciptakan difusivitas termal yang lebih kuat dibandingkan cakram referensi, dengan fluks panas keseluruhan lebih rendah.

Setelah mendapatkan nilai temperatur, hasil simulasi thermal diimport ke dalam simulasi static structural untuk mendapatkan nilai tegangan dan deformasi total.



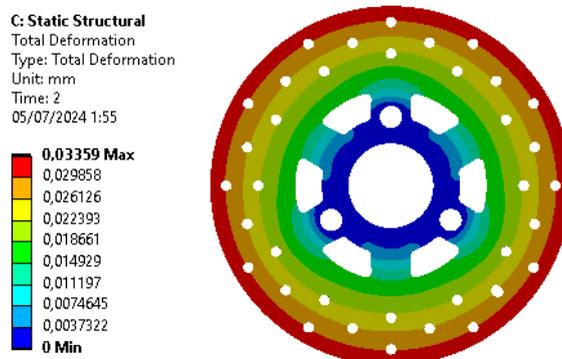
Gambar 16. Plot Kontur Equivalent Stress Cakram Rem Pada Desain Referensi

Gambar diatas merupakan hasil simulasi analisa statis berupa von-mises stress pada desain referensi, untuk memudahkan perbandingan hasil dari simulasi, nilai von-stress dari kelima desain disajikan pada tabel dibawah:

Tabel 6. Nilai Von-Mises Stress Analisa Statis Variasi Cakram Rem

No.	Variasi Desain	Von-Mises Stress (Mpa)	
		Maksimal	Minimal
1.	Desain Referensi	104,54	0,053796
2.	Desain 1	107,7	0,05156
3.	Desain 2	123,22	0,02556
4.	Desain 3	87,379	0,10935
5.	Desain 4	135,61	0,047325

Hasil analisis tegangan setelah pengereman menunjukkan tegangan tertinggi terjadi di area pemasangan cakram pada hub roda. Ini disebabkan oleh torsi dan gaya inersia yang mencegah pergerakan cakram. Tegangan terkonsentrasi di sekitar lubang pemasangan, meningkatkan risiko pecah jika diulang selama pengereman. Distribusi temperatur juga mempengaruhi tegangan karena pembebanan termal. Desain cakram 3 memberikan hasil terbaik dengan tegangan von Mises terendah, yaitu maksimum 87,379 Mpa dan minimum 0,10935 MPa.



Gambar 17. Plot Kontur Total Deformation Cakram Rem Pada Desain Referensi

Gambar diatas merupakan hasil simulasi analisa statis berupa total deformation pada desain referensi, untuk memudahkan perbandingan hasil dari simulasi, nilai total deformation dari kelima desain disajikan pada tabel dibawah:

Tabel 7. Nilai Total Deformasi Analisa Statis Variasi Cakram Rem

No.	Variasi Desain	Total Deformasi (mm)
1.	Desain Referensi	0,03359
2.	Desain 1	0,051202
3.	Desain 2	0,052323
4.	Desain 3	0,026322
5.	Desain 4	0,054227

Hasil analisis deformasi total menunjukkan bahwa desain cakram referensi memiliki deformasi maksimum 0,03359 mm, sementara desain cakram 3 menunjukkan performa terbaik dengan deformasi terendah 0,026322 mm.

Hasil Analisa Fatigue

Analisis Fatigue penting untuk memastikan keandalan dan keamanan struktur atau komponen selama masa operasinya.

Tabel 8. Nilai Fatigue Life Desain Cakram Rem

No.	Variasi Desain	Fatigue Life
1.	Desain Referensi	$8,89 \times 10^6$
2.	Desain 1	$7,0393e \times 10^6$
3.	Desain 2	$2,4392 \times 10^6$
4.	Desain 3	1×10^7
5.	Desain 4	$1,1474 \times 10^6$

Tabel 5 Nilai Fatigue Damage Desain Cakram Rem

No.	Variasi Desain	Fatigue Damage
1.	Desain Referensi	$8,89 \times 10^6$
2.	Desain 1	$7,0393e \times 10^6$
3.	Desain 2	$2,4392 \times 10^6$
4.	Desain 3	1×10^7
5.	Desain 4	$1,1474 \times 10^6$

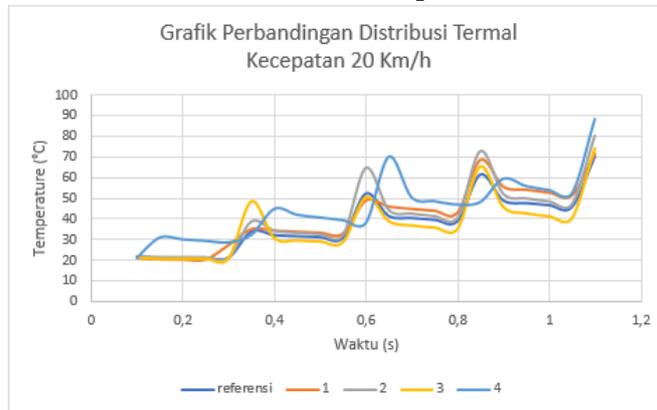
Tabel 9. Nilai Fatigue Safety Factor Desain Cakram Rem

No.	Variasi Desain	Fatigue Safety Factor
1.	Desain Referensi	0,9853
2.	Desain 1	0,95638
3.	Desain 2	0,8359
4.	Desain 3	1,1788
5.	Desain 4	0,75953

Hasil analisis fatigue life menunjukkan variasi signifikan dalam ketahanan siklus beban berulang. Desain 3 menunjukkan ketahanan terbaik dengan masa pakai maksimum dan kerusakan kelelahan terendah. Analisis faktor keamanan kelelahan menunjukkan bahwa hanya desain 3 yang memiliki faktor keamanan lebih dari 1. Metode Goodman mengonfirmasi desain 3 memiliki tegangan mean dan siklik dalam batas aman.

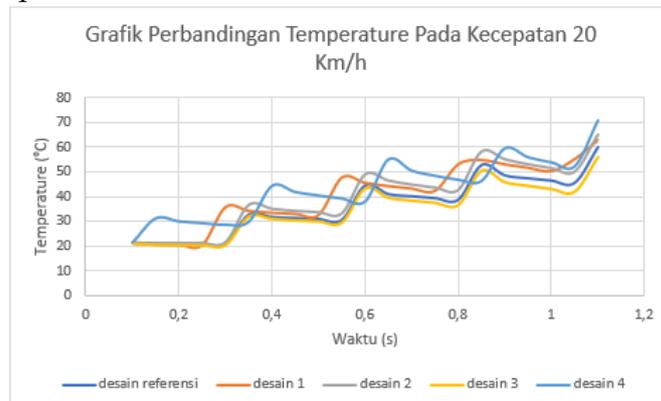
Analisa Dinamis

Simulasi dinamis ini menjelaskan tentang hasil yang didapatkan pada saat E-scooter bergerak dengan variasi cakram rem dan kecepatan yang berbeda yaitu pada kecepatan 20 Km/h, 40 Km/h, dan 60 Km/h. Untuk mendapatkan beban dinamis ini yaitu dengan memodelkan bantalan dan rem kemudian disimulasikan menggunakan Software Abaqus. Berikut adalah hasil analisa dinamis yang mencakup distribusi termal, temperature, dan tegangan. Gambar hasil analisa dinamis diwakilkan pada salah satu kecepatan.



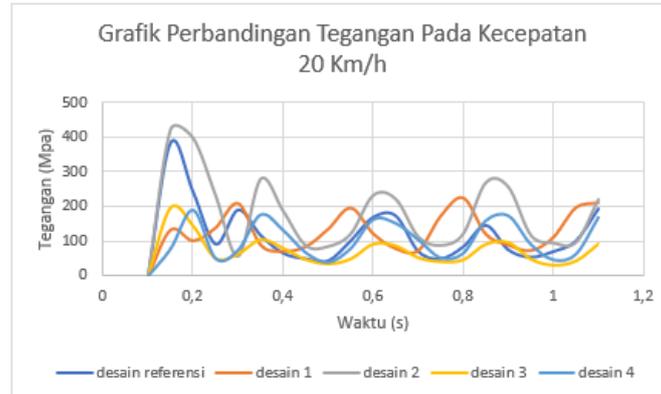
Gambar 18. Perbandingan Hasil Analisa Dinamis Distribusi Termal Kecepatan 20 Km/h

Pada kecepatan 20 Km/jam, distribusi termal menunjukkan peningkatan hingga mencapai titik tertinggi pada permukaan cakram variasi ke-4 sebesar 88,5°C, sementara nilai terendah tercatat pada cakram model ke-3 sebesar 74,16°C. Pada kecepatan 40 Km/jam, distribusi termal tertinggi pada cakram variasi ke-4 mencapai 147°C, sedangkan terendah pada cakram model ke-3 adalah 114°C. Pada kecepatan 60 Km/jam, distribusi termal tertinggi pada cakram variasi ke-4 adalah 202°C, dengan nilai terendah pada cakram model ke-3 sebesar 148°C. Desain cakram model ke-3 menunjukkan kemampuan pembuangan panas terbaik di semua kecepatan.



Gambar 19. Perbandingan Hasil Analisa Dinamis Temperature Kecepatan 20 Km/h

Pada kecepatan 20, 40, dan 60 km/jam, suhu permukaan cakram rem berfluktuasi selama pengereman, meningkat saat area titik bersentuhan dengan bantalan rem dan menurun ketika tidak bersentuhan. Suhu rata-rata keseluruhan meningkat setelah pengereman berakhir. Pada kecepatan 20 km/jam, suhu tertinggi adalah 73,4°C dan terendah 55,7°C. Pada kecepatan 40 km/jam, suhu tertinggi adalah 124°C dan terendah 88°C. Pada kecepatan 60 km/jam, suhu tertinggi adalah 170,2°C dan terendah 113,9°C. Variasi ke-4 selalu mencatat suhu tertinggi, sementara variasi cakram model ke-3 mencatat suhu terendah pada semua kecepatan. Secara umum, peningkatan kecepatan menunjukkan bahwa kecepatan mempengaruhi kenaikan suhu selama pengereman.



Gambar 20. Grafik Perbandingan Hasil Analisa Dinamis Tegangan Kecepatan 20 Km/h

Pada kecepatan 20, 40, dan 60 km/jam, cakram rem mengalami tekanan awal yang menghasilkan medan tegangan von Mises, terutama di area kontak dengan kampas rem dan sekrup roda, dengan pemanasan piringan menyebabkan deformasi termal yang menambah tekanan mekanis. Tegangan von Mises meningkat pesat pada awal gesekan karena gaya inersia, koefisien gesekan tinggi, dan inisiasi kontak, namun menurun seiring waktu karena distribusi beban lebih merata dan penurunan kecepatan relatif. Pada kecepatan 20 km/jam, Desain 3 dan Desain 1 menunjukkan performa pengereman terbaik dengan tegangan rendah dan stabil. Pada kecepatan 40 km/jam, Desain 3 menonjol dengan distribusi beban merata dan performa pengereman baik. Pada kecepatan 60 km/jam, Desain 3 menjadi pilihan terbaik dengan tegangan rendah, stabil, dan distribusi yang lebih merata, meskipun ada beberapa puncak. Desain 4 menunjukkan fluktuasi besar di semua kecepatan, menandakan ketidakstabilan.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Desain geometris cakram rem mempengaruhi karakteristik termo-mekanis, dengan model 3 menunjukkan performa terbaik. Hasil analisis termal dan struktural statis menunjukkan model 3 dengan Total Heat Flux $1,0576 \text{ W/mm}^2$, Temperatur Maksimal $126,79 \text{ }^\circ\text{C}$, Von-Mises Stress Maksimum $62,269 \text{ Mpa}$, dan Deformasi Total $0,018962 \text{ mm}$. Simulasi dinamis menunjukkan distribusi termal dan tegangan yang konsisten dan merata pada model 3. Analisa fatigue menunjukkan model 3 memiliki fatigue life 1×10^7 siklus, dan fatigue safety factor $1,1788$. Simulasi performa menggunakan Simulink menunjukkan bahwa model 3 memiliki pengaruh tidak signifikan terhadap jarak dan waktu pengereman, dengan desain 3 menunjukkan hasil terbaik di antara kelima desain.

SARAN

Setelah penelitian pengembangan desain cakram rem pada electric scooter, saran untuk penelitian selanjutnya meliputi: penelitian variasi material cakram rem, optimasi geometri dan material bantalan rem, penelitian manufaktur dan uji jalan desain cakram rem, serta penelitian sistem pengereman ABS pada electric scooter.

DAFTAR RUJUKAN

Anandan, D., & Krishnamurthy, P. (2020). Brake Optimization Technique using Simulink. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(9), 2350–2355. <https://www.irjet.net/archives/V7/i9/IRJET-V7I9419.pdf>

- Belhocine, A., & Bouchetara, M. (2012). Thermal behavior of full and ventilated disc brakes of vehicles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(11), 3643–3652. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0840-6>
- Hardt, C., & Bogenberger, K. (2019). Usage of e-Scooters in Urban Environments. *Transportation Research Procedia*, 37(September 2018), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.178>
- Hariharan, V. S., & Bhavani, M. (2015). *Modelling and Analysis of Disc Brake Rotor under Various Loading Conditions*. 1–54. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2016.0504204>
- KARABUDAK, F. (2021). Fatigue analysis of the vehicle brake disc. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11, 1188–1197. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.822064>
- Maleque, M. A., Dyuti, S., & Rahman, M. M. (2010). Material selection method in design of automotive brake disc. *WCE 2010 - World Congress on Engineering 2010*, 3, 2322–2326.
- Manjunath, H. S., & Kumar N, S. S. (2019). Fatigue and Static Thermal Analysis of Brake Disc for SAE Based Cars. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2127–2132. www.irjet.net
- Mary, A. (2020). *Anti Lock Braking System Using Simulink*. August.
- Patel, M., Khatod, V., Patel, A., Radadiya, N., & Patel, R. (2019). Topology Optimization of Disc Brake Rotor. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 9(2), 3150–3153. <https://doi.org/10.35940/ijeat.b4437.129219>
- Pradhan, D. S., M, S., rithvik, P., & Teja, K. R. (2022). Modelling and analysis of ventilated disc Brakes using Creo and FEA software. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 10(6), 1359–1370. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.43959>
- Sarkar, S. (2013). Review Paper on Thermal Analysis of Ventilating Disc Brake by Varying Design Parameters. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2(12), 1077–1081.
- Sasikiran, N. V. S. G., Reddy, M., Kumar, V., Sasikanth, S., & Rao, V. (2022). *Topology Optimization of Brake Disc Rotor*. 8, 81–88.
- Singh Negi, V., Deshpande, A., & Deshmukh, N. (2018). Design of Brake Disc for Hydraulic Brakes. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 735–740. www.irjet.net
- Vishvajeet, Ahmad, F., Sethi, M., & Tripathi, R. K. (2021). Thermo-mechanical analysis of disk brake using finite element analysis. *Materials Today: Proceedings*, 47(xxxx), 4316–4321. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.614>
- Zhang, S., Han, Z., Hao, Q., Liu, Y., Sha, Z., Ma, F., & Yang, D. (2019). Fatigue life calculation of high-power disc brake under thermal-mechanical coupling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 692(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/692/1/012022>