

PENGARUH *FILLET* DAN *TAPERED GROOVE* TERHADAP RESPONS TERMAL DAN MEKANIKAL REM TROMOL MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS* (FEA)

M Arifbillah Yasandi¹, Remon Lapisa², Delima Yanti Sari³, Febri Prasetya⁴

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang^{1,2,3,4}

e-mail: arifbillah4123@gmail.com

Diterima: 10/9/2026; Direvisi: 19/10/2026; Diterbitkan: 23/10/2026

ABSTRAK

Rem tromol merupakan komponen sistem pengereman yang mengalami pembebanan termal dan mekanik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh modifikasi *fillet* dan geometri alur pendinginan terhadap respons termomekanik rem tromol menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Tujuh variasi geometri disimulasikan pada kecepatan pengereman 40, 60, 80, dan 100 km/jam dengan parameter temperatur, *total deformation*, tegangan von Mises, *Safety Factor*, dan *Fatigue Life*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa modifikasi geometri relatif kecil pengaruhnya terhadap temperatur maksimum dan deformasi, tetapi lebih berpengaruh terhadap distribusi tegangan. Pada kecepatan 100 km/jam, geometri *slant-tapered* 28° menghasilkan tegangan von Mises terendah sebesar 27,311 MPa dan *Safety Factor* tertinggi sebesar 2,8569. Dibandingkan geometri *slant-grooved*, modifikasi *fillet* 0,2 mm menurunkan tegangan maksimum sebesar 21,76%, sedangkan geometri *slant-tapered* 28° menurunkannya sebesar 43,53%. Seluruh variasi menghasilkan *Fatigue Life* sebesar 1×10^8 siklus karena mencapai batas *runout* kurva S–N yang digunakan. Hasil ini menunjukkan bahwa geometri *slant-tapered* 28° memiliki respons mekanik paling baik di antara konfigurasi yang disimulasikan. Temuan ini dapat menjadi pertimbangan awal dalam optimasi desain rem tromol, tetapi belum membuktikan keunggulan keselamatan dalam penggunaan nyata.

Kata Kunci: *Rem Tromol, Analisis Termomekanik, Finite Element Analysis, Von Mises Stress, Safety Factor, Fatigue Life*

ABSTRACT

Drum brakes are components of braking systems that are subjected to thermal and mechanical loading. This study aims to analyze the effects of fillet modifications and cooling groove geometries on the thermomechanical response of drum brakes using the Finite Element Analysis (FEA) method. Seven geometric configurations were simulated at braking speeds of 40, 60, 80, and 100 km/h, evaluating temperature, total deformation, von Mises stress, safety factor, and fatigue life. The simulation results indicate that geometric modifications have a relatively minor effect on maximum temperature and deformation but a greater influence on stress distribution. At a braking speed of 100 km/h, the 28° slant-tapered geometry produced the lowest von Mises stress of 27.311 MPa and the highest safety factor of 2.8569. Compared with the slant-grooved geometry, the 0.2 mm fillet modification reduced the maximum stress by 21.76%, while the 28° slant-tapered geometry reduced it by 43.53%. All configurations yielded a fatigue life of 1×10^8 cycles because they reached the runout limit of the S–N curve used. These results indicate that the 28° slant-tapered geometry exhibited the best mechanical response among the simulated configurations. The findings may serve as an initial consideration for drum brake design optimization; however, they do not establish superior safety performance under actual operating conditions.

Keywords: *Drum brake, Thermomechanical Analysis, Finite Element Analysis, von Mises Stress, Safety Factor, Fatigue Life*

PENDAHULUAN

Rem tromol merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pengereman kendaraan roda dua karena memiliki ketahanan terhadap kontaminasi lingkungan dan biaya produksi yang relatif efisien. Selama pengereman, energi kinetik dikonversi menjadi energi panas akibat gesekan antara kampas dan tromol. Akumulasi panas dapat meningkatkan temperatur komponen serta memicu deformasi dan tegangan termal yang berpotensi memengaruhi keandalan sistem pengereman (Khatir et al., 2022; Fikri et al., 2025).

Modifikasi alur pendinginan merupakan salah satu pendekatan untuk mengubah distribusi panas dan karakteristik termal rem tromol. Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa perubahan geometri alur pendinginan dapat memengaruhi temperatur dan kinerja pengereman sepeda motor (Lapisa et al., 2022). Selain itu, metode *Finite Element Analysis* (FEA) telah digunakan untuk mengevaluasi distribusi temperatur, deformasi, dan tegangan pada komponen pengereman melalui analisis termal-struktural (Choy et al., 2023; Fikri et al., 2025; Utama et al., 2025). Pendekatan analisis termal-struktural berpasangan juga diterapkan untuk mengevaluasi distribusi temperatur dan tegangan pada cakram rem kendaraan berat serta komponen pengereman lainnya (Bena et al., 2022; Qu et al., 2022; Ayuhikmatin Sekarjati et al., 2025).

Penelitian terdahulu juga telah mengkaji respons termomekanik rotor rem sepeda motor serta pengaruh kondisi pengereman terhadap distribusi temperatur dan tegangan melalui simulasi elemen hingga (Porlekar & Kolekar, 2025; Lei, 2025). Meskipun demikian, kajian yang secara khusus membandingkan pengaruh modifikasi *fillet*, geometri *tapered groove*, dan kombinasi keduanya terhadap respons termomekanik rem tromol masih perlu dikembangkan. Kesenjangan ini penting karena perubahan geometri tidak hanya berpotensi memengaruhi pelepasan panas, tetapi juga distribusi tegangan dan karakteristik mekanik komponen. Daerah transisi alur dengan perubahan penampang yang tajam berpotensi menghasilkan konsentrasi tegangan lokal. Analisis termomekanik pada komponen pengereman menegaskan pentingnya mengevaluasi distribusi tegangan akibat pembebanan termal dan pengaruh geometri terhadap respons struktural komponen (Deressa & Ambie, 2024; Qi et al., 2025).

Kajian optimasi desain rotor rem juga menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi geometri dapat memengaruhi karakteristik termal dan mekanikal komponen (Porlekar & Kolekar, 2026; Zhang et al., 2026). Sementara itu, pemodelan elemen hingga dan pengujian pada rem tromol telah digunakan untuk menganalisis perilaku getaran akibat gesekan (Schmid et al., 2022). Berdasarkan kesenjangan tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi komparatif tujuh konfigurasi geometri rem tromol, yang mencakup variasi alur lurus, alur miring, penambahan *fillet* 0,2 mm, serta alur *tapered* dengan sudut berbeda, pada empat variasi kecepatan pengereman. Evaluasi dilakukan secara terpadu terhadap temperatur, *total deformation*, tegangan von Mises, *Safety Factor*, dan *Fatigue Life* untuk mengidentifikasi pengaruh modifikasi geometri terhadap respons termomekanik berdasarkan hasil simulasi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar analitis untuk mempertimbangkan konfigurasi geometri dalam optimasi desain rem tromol, tanpa menggeneralisasi hasil simulasi sebagai bukti kinerja atau keselamatan dalam penggunaan nyata.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) berbantuan ANSYS Workbench untuk menganalisis respons termal dan mekanikal rem tromol selama proses pengereman. Analisis dilakukan secara berurutan melalui *Transient Thermal*, *Transient Structural*, dan analisis kelelahan (*fatigue*) berbasis kurva S–N. Distribusi temperatur dari analisis *Transient Thermal* digunakan sebagai masukan untuk analisis *Transient Structural*, sedangkan hasil tegangan digunakan dalam evaluasi *Safety Factor* dan *Fatigue Life*. Sebelum simulasi utama, dilakukan studi konvergensi *mesh* untuk menilai pengaruh ukuran elemen terhadap hasil tegangan. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap hasil analitik dan/atau hasil penelitian terdahulu yang relevan. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



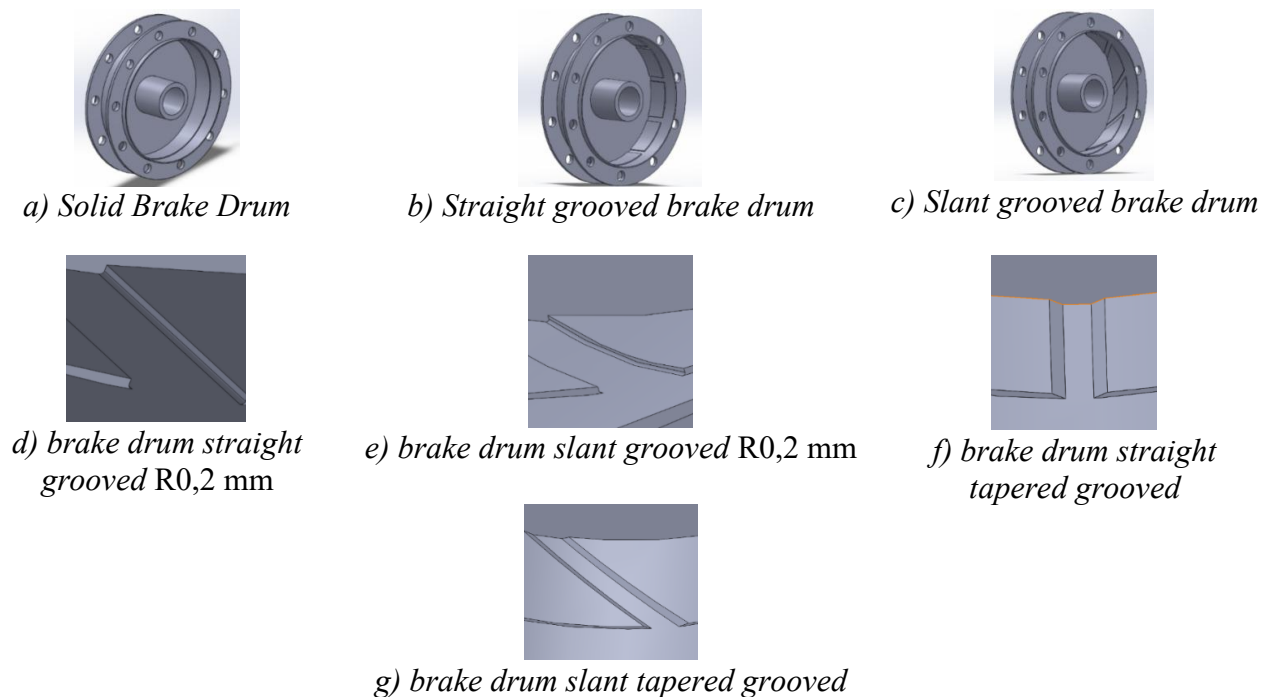
Gambar 1. Diagram Alir Simulasi

1. Geometri dan Variasi Model

Model rem tromol memiliki diameter luar 170 mm, diameter dalam 130 mm, dan ketebalan 45 mm yang diadaptasi dari rancangan Lapisa et al. (2022). Tujuh konfigurasi geometri digunakan untuk mengevaluasi pengaruh bentuk alur pendinginan dan penambahan

fillet terhadap respons termomekanik. Konfigurasi tersebut meliputi model *solid* sebagai pembanding dasar (*baseline*), *straight-grooved*, *slant-grooved*, *straight-grooved* dengan *fillet* 0,2 mm, *slant-grooved* dengan *fillet* 0,2 mm, *straight-tapered groove* 22°, dan *slant-tapered groove* 28°. Pada geometri *tapered groove*, lebar mulut alur adalah 5 mm dan lebar dasar 2,5 mm, dengan perubahan lebar secara linier.

Variasi geometri tersebut memungkinkan perbandingan respons model tanpa alur, model dengan alur konvensional, model dengan pembulatan pada transisi alur, dan model dengan alur meruncing. Perbandingan ini digunakan untuk mengidentifikasi konfigurasi yang menghasilkan respons tegangan dan deformasi yang lebih rendah berdasarkan kondisi simulasi yang sama. Visualisasi seluruh konfigurasi disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Drum Brake

2. Material dan Parameter Simulasi

Material rem tromol dimodelkan menggunakan besi cor kelabu (*gray cast iron*). Sifat material yang digunakan dalam simulasi meliputi densitas, modulus elastisitas, rasio Poisson, konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik, koefisien muai termal, dan kekuatan tarik. Parameter tersebut diperlukan untuk merepresentasikan respons termal dan mekanikal material terhadap pembebanan selama pengereman. Nilai sifat material yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Sifat Material

No	Parameter	Nilai
1.	Density	7200 kg/m ³
2.	Young modulus	110 Gpa
3.	Poisson Ratio	0,27
4.	Thermal Conductivity	55 W/m.K
5.	Specific Heat Capacity	447 J/kg.K
6.	Coeff. Of thermal	11 x 10 ⁻⁶ /K
7.	Tensile Strenght	240 Mpa

Data pada Tabel 1 menjadi dasar pemodelan sifat termal dan mekanikal material. Untuk memastikan replikasi, sumber setiap nilai material dan kesesuaiannya dengan jenis serta kondisi material sebenarnya perlu dicantumkan, termasuk asumsi sifat material konstan terhadap temperatur karena perubahan sifat pada temperatur tinggi dapat memengaruhi hasil analisis termomekanik. Parameter simulasi dan kondisi batas ditetapkan berdasarkan Fikri et al. (2025) serta literatur terkait, meliputi kondisi awal, kecepatan pengereman, durasi simulasi, koefisien gesek, distribusi beban pengereman, luas kontak, ukuran mesh, dan kondisi pengekanan model. Rincian parameter ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Simulasi dan Kondisi Batas

No	Parameter	Nilai
1.	Suhu awal (ambient)	30°C
2.	Koefisien gesek (μ)	0,4
3.	Massa kendaraan efektif	100 kg
4.	Distribusi rem belakang	25 %
5.	Kecepatan awal (v_0)	40 / 60 / 80 / 100 km/jam
6.	Durasi pengereman	3 s
7.	Emisivitas material (ϵ)	$5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
8.	Luas area gesek	408,40 mm ²
9.	Ukuran mesh	5 mm Global, 0,4 mm Fillet dan Tapered
10.	Fixed support	Hub (bagian tengah drum)

Tabel 2 menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi dianalisis menggunakan variasi kecepatan dan durasi pengereman yang sama sehingga pengaruh perubahan geometri dapat dibandingkan secara konsisten. Meskipun demikian, parameter pada tabel belum sepenuhnya menjelaskan kondisi perpindahan panas dan mekanisme pembebanan. Oleh karena itu, koefisien konveksi, temperatur lingkungan, kondisi radiasi, serta penerapan kondisi kontak dan pengekanan perlu dijelaskan secara terpisah sesuai pengaturan aktual dalam ANSYS Workbench. Nilai emisivitas juga perlu dibedakan dari konstanta Stefan–Boltzmann yang digunakan dalam pemodelan radiasi.

3. Pembebanan Heat flux

Pembebanan termal dimodelkan melalui heat flux pada permukaan dalam tromol yang merepresentasikan area kontak gesekan dengan kampas rem. Besarnya beban ditentukan berdasarkan daya gesek dan luas kontak, lalu diterapkan selama 3 detik sebagai fungsi waktu untuk merepresentasikan penurunan beban termal selama pengereman. Simulasi dilakukan pada kecepatan awal 40, 60, 80, dan 100 km/jam untuk mengevaluasi perubahan respons termal. Nilai heat flux pada setiap kecepatan dan waktu disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai Heat Flux berdasarkan (Fikri et al., 2025)

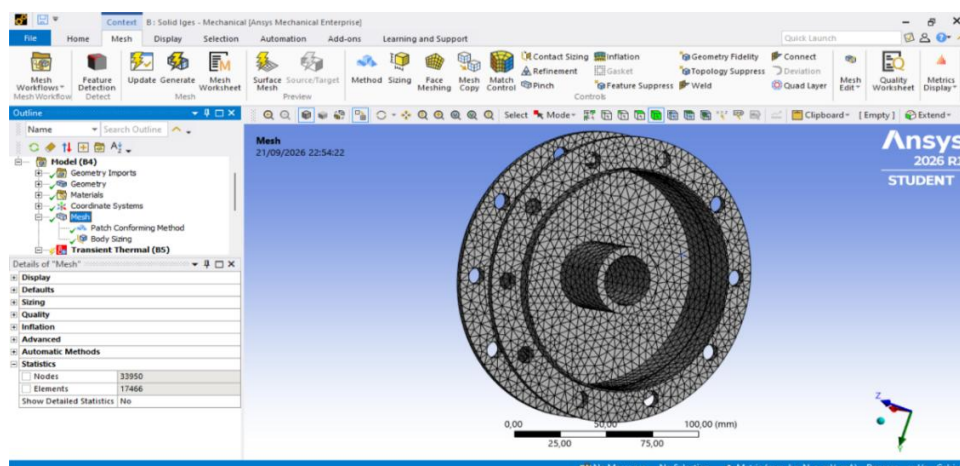
Waktu (S)	Heatflux 40 Km/Jam	Heatflux 60 Km/Jam	Heatflux 80 Km/Jam	Heatflux 100 Km/Jam
0	0,021359941	0,032049525	0,042719882	0,053409466
0,25	0,019591161	0,029377129	0,039163097	0,048949064
0,5	0,017803155	0,026704733	0,035606311	0,044507888
0,75	0,016015149	0,024032337	0,032049525	0,040047487
1	0,014246369	0,021359941	0,028473513	0,035606311
1,25	0,012458364	0,018687545	0,024916727	0,031145909
1,5	0,010689584	0,016015149	0,021359941	0,026704733

1,75	0,008901578	0,013342754	0,017803155	0,022244331
2	0,007113572	0,010689584	0,014246369	0,017803155
2,25	0,005344792	0,008017188	0,010689584	0,013342754
2,5	0,003556786	0,005344792	0,007113572	0,008901578
2,75	0,001788006	0,002672396	0,003556786	0,004441176
3	0	0	0	0

Tabel 3 memperlihatkan bahwa nilai *heat flux* menurun terhadap waktu dan meningkat seiring bertambahnya kecepatan awal pengereman. Pada awal simulasi, nilai terbesar diterapkan pada kecepatan 100 km/jam, sedangkan pada akhir durasi pengereman seluruh variasi mencapai nilai nol. Pola tersebut merepresentasikan beban termal yang berkurang selama pengereman. Sebelum hasil ini digunakan sebagai dasar analisis, satuan *heat flux* wajib dipastikan berdasarkan data sumber dan pengaturan ANSYS. Nilai numerik tanpa satuan tidak cukup untuk mereplikasi pembebanan termal atau memeriksa konsistensinya terhadap daya gesek dan luas kontak.

4. Meshing dan Konvergensi Mesh

Diskretisasi geometri dilakukan melalui *meshing* pada model rem tromol, dengan ukuran elemen global 5 mm dan elemen lokal yang diperhalus pada daerah *fillet* dan *tapered groove* untuk menangkap perubahan tegangan. Uji konvergensi dilakukan pada konfigurasi *straight-grooved* dengan *fillet* 0,2 mm menggunakan variasi ukuran mesh lokal 0,2; 0,3; 0,4; dan 0,6 mm, sedangkan ukuran global dipertahankan 5 mm. Pengujian ini mengevaluasi pengaruh ukuran elemen terhadap hasil tegangan pada daerah yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan. Tampilan model setelah *meshing* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Drum brake setelah di Meshing

Gambar 3 menunjukkan hasil diskretisasi model rem tromol dengan perapatan elemen pada daerah *fillet* dan *tapered groove*. Perapatan elemen dipilih karena kedua daerah tersebut memiliki perubahan geometri yang dapat menimbulkan konsentrasi tegangan. Ukuran elemen yang lebih kecil membantu merepresentasikan perubahan distribusi tegangan secara lebih terperinci sehingga hasil simulasi pada area kritis dapat dianalisis dengan lebih baik.

5. Analisis Transient Thermal dan Transient Structural

Analisis Transient Thermal digunakan untuk menghitung distribusi temperatur selama pengereman 3 detik, dengan temperatur awal 30 °C dan variasi heat flux sesuai Tabel 3. Perpindahan panas melalui konveksi dan radiasi serta pengaturan analisis transien ditetapkan sesuai konfigurasi aktual ANSYS Workbench. Distribusi temperatur kemudian diterapkan pada analisis Transient Structural dengan fixed support pada bagian hub. Respons struktural dievaluasi berdasarkan total deformation dan tegangan ekuivalen von Mises untuk membandingkan pengaruh variasi geometri dan kecepatan pengereman.

6. Analisis Fatigue

Analisis kelelahan dilakukan menggunakan pendekatan *Stress-Life* berdasarkan kurva S–N material besi cor kelabu EN-GJL-250 untuk memperkirakan umur lelah dan *Safety Factor* berdasarkan respons tegangan hasil simulasi. Evaluasi ini mempertimbangkan distribusi tegangan, kondisi pembebanan, serta pengaruh termal sebagaimana dibahas dalam penelitian terdahulu. Data jumlah siklus dan tegangan bolak-balik yang digunakan sebagai masukan simulasi disajikan pada Tabel 4, dengan batas *runout* sebesar 1×10^8 siklus.

Tabel 4. Data Kurva S–N Material Besi Cor Kelabu EN-GJL-250

No.	Cycles	Alternating Stress (MPa)
1	100.000	100,0
2	200.000	98,0
3	500.000	95,0
4	1.000.000	92,0
5	2.000.000	90,0
6	5.000.000	87,0
7	10.000.000	85,0
8	20.000.000	83,0
9	50.000.000	80,0
10	100.000.000	78,0

Data pada Tabel 4 menunjukkan bahwa tegangan bolak-balik menurun seiring bertambahnya jumlah siklus. Kurva S–N digunakan ANSYS untuk memperkirakan umur lelah berdasarkan tegangan model, dengan ketepatan hasil bergantung pada kesesuaian data material, perlakuan material, dan asumsi pembebanan. Oleh karena itu, sumber kurva S–N, metode pemasukan data, rasio tegangan (stress ratio), dan pengaturan analisis kelelahan perlu dijelaskan sesuai konfigurasi aktual. Jika seluruh variasi menghasilkan umur lelah sebesar 1×10^8 siklus, hasil tersebut perlu ditafsirkan sebagai pencapaian batas runout kurva, bukan bukti bahwa umur lelah aktual seluruh konfigurasi identik. Dengan demikian, hasil simulasi merupakan estimasi numerik yang bergantung pada asumsi dan data material, sehingga tidak menggantikan pengujian kelelahan eksperimental.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

1. Konvergensi Mesh

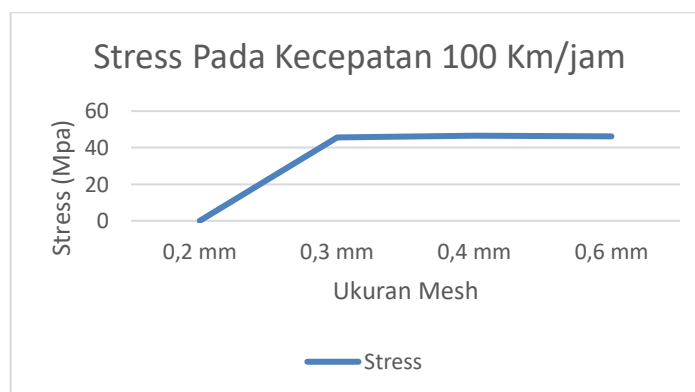
Uji konvergensi *mesh* dilakukan pada model rem tromol dengan konfigurasi *straight-grooved* dan *fillet* 0,2 mm pada kecepatan pengereman 100 km/jam. Pengujian menggunakan empat variasi ukuran *mesh* lokal, yaitu 0,2; 0,3; 0,4; dan 0,6 mm, dengan ukuran *mesh* global

tetap sebesar 5 mm. Parameter yang diamati meliputi temperatur, deformasi total, tegangan, serta jumlah *node* dan elemen yang dihasilkan. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kestabilan respons numerik sekaligus mempertimbangkan keterbatasan komputasi ANSYS Student/Academic. Hasil dari uji konvergensi dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 4. Hasil Uji Konvergensi Mesh

Kecepatan	Ukuran Mesh Lokal	Temperature	Deformasi	Stress	Node	Element
100 km/jam	0,2 mm	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
100 km/jam	0,3 mm	41,927	0,0042442	45,727	74338	42851
100 km/jam	0,4 mm	41,925	0,0045414	46,558	57904	33324
100 km/jam	0,6 mm	41,945	0,0048399	46,076	47164	26944

Hasil uji konvergensi pada Tabel 5 menunjukkan bahwa pemilihan ukuran mesh memengaruhi hasil simulasi, sedangkan penggunaan mesh lokal 0,2 mm tidak dapat dilakukan karena keterbatasan lisensi ANSYS terkait jumlah node dan elemen. Ukuran mesh lokal 0,4 mm dipilih untuk simulasi utama dengan mempertimbangkan kestabilan hasil numerik dan kebutuhan komputasi. Meskipun demikian, pemilihan tersebut belum memastikan konvergensi penuh sehingga pengujian dengan elemen yang lebih halus masih diperlukan. Hubungan antara ukuran mesh dan tegangan hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Nilai Stress terhadap Ukuran Mesh

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara ukuran mesh dan nilai tegangan (stress) yang dihasilkan dari simulasi. Perubahan ukuran mesh menghasilkan perbedaan nilai tegangan, yang menunjukkan bahwa hasil simulasi masih dipengaruhi oleh tingkat diskretisasi model. Nilai tegangan pada ukuran mesh lokal 0,4 mm dan 0,6 mm memiliki perbedaan sekitar 1,05%, sehingga ukuran 0,4 mm dipilih untuk simulasi utama dengan mempertimbangkan kestabilan hasil dan kebutuhan komputasi. Meskipun demikian, pengujian menggunakan ukuran mesh yang lebih halus tetap diperlukan untuk memastikan konvergensi hasil simulasi.

2. Simulasi *Coupled Transient Thermal* dan *Transient Struktural*

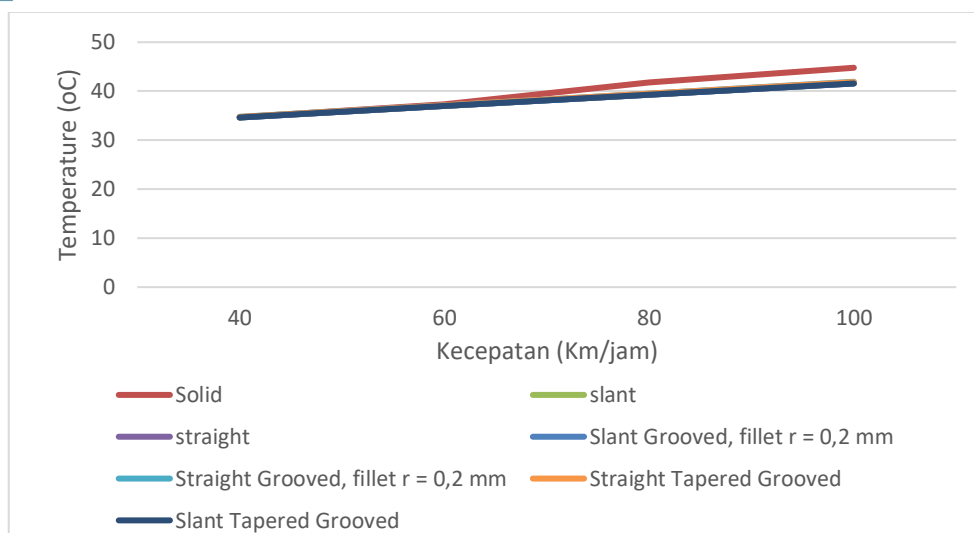
Setelah melakukan analisis *transient thermal* dan *transient struktural* pada simulasi pengereman, maka diperoleh hasil berupa distribusi suhu, deformasi total, tegangan von mises, *Fatigue Life*, dan *Safety Factor*. Seluruh konfigurasi dianalisis menggunakan kondisi pembebanan dan parameter simulasi yang telah ditetapkan agar respons masing-masing

geometri dapat dibandingkan. Hasil pada masing-masing variasi desain brake drum dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

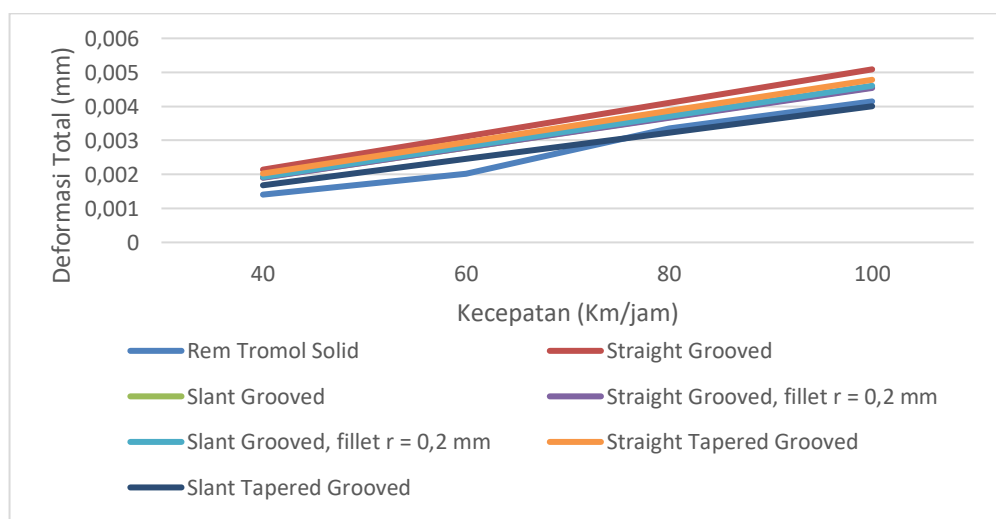
Tabel 5. Hasil Simulasi Coupled Transient Thermal-Structural

NO	Model drum brake	Kecepatan (km/jam)	Distribusi Suhu Maks. (°C)	Deformasi Total (mm)	Tegangan von Mises Maks. (MPa)	Fatigue Life (siklus)	Safety Factor
1.	Rem Tromol Solid	40	34,895	0,0014053	11,479	1×10^8	6,7952
		60	38,844	0,0020232	17,086	1×10^8	4,565
		80	41,791	0,0033489	31,473	1×10^8	2,4784
		100	44,738	0,0041455	39,277	1×10^8	1,9859
2.	Straight grooved	40	34,789	0,0021407	20,201	1×10^8	3,8611
		60	37,184	0,0031224	30,749	1×10^8	2,5367
		80	39,577	0,0041051	41,296	1×10^8	1,8888
		100	41,971	0,0050892	51,842	1×10^8	1,5046
3.	Slant grooved	40	34,642	0,0019092	19,76	1×10^8	3,9474
		60	36,962	0,0027916	29,29	1×10^8	2,663
		80	39,282	0,0036747	38,825	1×10^8	2,009
		100	41,643	0,0045585	48,363	1×10^8	1,6128
4.	Straight grooved, fillet r = 0,2 mm	40	34,771	0,0019015	18,343	1×10^8	4,2522
		60	37,156	0,0027807	27,748	1×10^8	2,811
		80	39,541	0,0036607	37,154	1×10^8	2,0994
		100	41,925	0,0045414	46,558	1×10^8	1,6753
5.	Slant grooved, fillet r = 0,2 mm	40	34,643	0,0019255	15,302	1×10^8	5,0972
		60	36,964	0,0028182	22,812	1×10^8	3,4192
		80	39,284	0,0037116	30,325	1×10^8	2,5722
		100	41,604	0,0046057	37,839	1×10^8	2,0614
6.	Straight Tapered grooved	40	34,745	0,0020255	11,834	1×10^8	6,5912
		60	37,117	0,0029432	17,981	1×10^8	4,3378
		80	39,489	0,0038617	24,129	1×10^8	3,2326
		100	41,86	0,0047812	30,277	1×10^8	2,5762
7.	Slant tapered grooved	40	34,632	0,0016802	10,871	1×10^8	7,1752
		60	36,947	0,0024543	16,349	1×10^8	4,7709
		80	39,262	0,0032289	21,83	1×10^8	3,5731
		100	41,577	0,004004	27,311	1×10^8	2,856

Tabel 6 di atas menyajikan hasil simulasi temperatur maksimum, deformasi total, tegangan von Mises, Fatigue Life, dan Safety Factor pada seluruh konfigurasi dan variasi kecepatan pengereman. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan cenderung meningkatkan respons termal dan mekanikal, sedangkan perbedaan nilai antargeometri mengindikasikan adanya pengaruh modifikasi alur terhadap respons komponen. Nilai Fatigue Life yang sama pada seluruh konfigurasi belum menunjukkan kesetaraan ketahanan lelah aktual karena hasilnya dibatasi oleh kurva S–N yang digunakan. Untuk memperjelas kecenderungan perubahan respons terhadap kecepatan serta memudahkan perbandingan antargeometri, hasil temperatur maksimum dan deformasi total selanjutnya disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

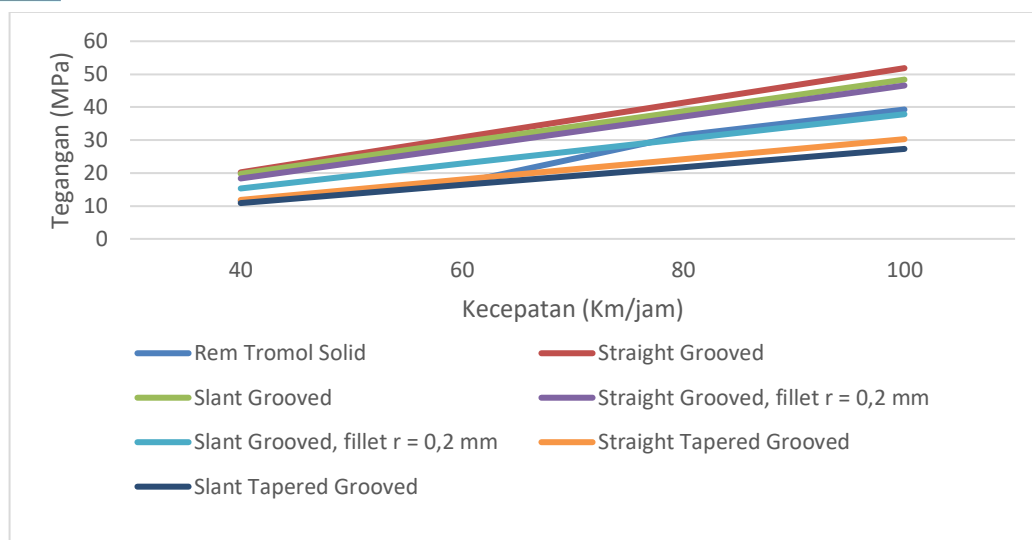


Gambar 5. Pengaruh kecepatan pengereman terhadap temperatur maksimum



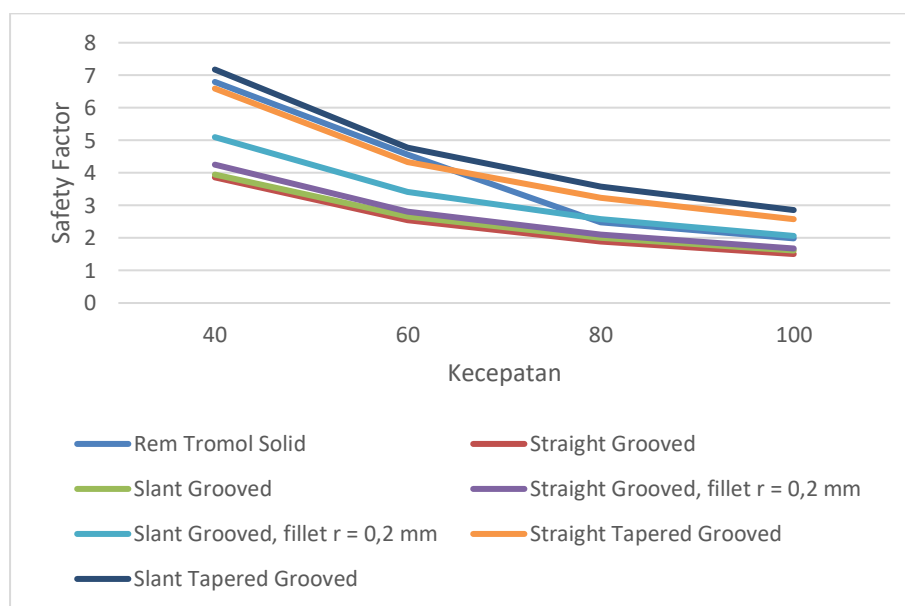
Gambar 6. Pengaruh kecepatan pengereman terhadap deformasi total

Gambar 5 dan Gambar 6 menyajikan hasil simulasi respons mekanikal rem tromol berdasarkan deformasi total dan tegangan von Mises maksimum pada berbagai konfigurasi dan kecepatan pengereman. Kedua parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi respons mekanikal terhadap variasi geometri dalam kondisi simulasi yang sama. Interpretasi hasil perlu mempertimbangkan kondisi pengekanan, sifat material, dan asumsi pembebanan yang diterapkan dalam model. Perbandingan tegangan von Mises maksimum pada setiap konfigurasi rem tromol disajikan pada Gambar 7.



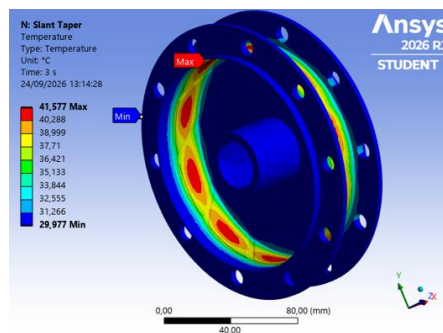
Gambar 7. Pengaruh kecepatan pengereman terhadap tegangan von Mises maksimum

Gambar 7 memperlihatkan bahwa perbedaan geometri alur menghasilkan variasi tegangan von Mises pada setiap kecepatan pengereman, dengan konfigurasi slant-tapered groove menghasilkan tegangan terendah sebesar 27,311 MPa dan straight-grooved tertinggi sebesar 51,842 MPa pada kecepatan 100 km/jam. Perbedaan respons tegangan tersebut menjadi dasar untuk mengevaluasi margin terhadap kriteria kegagalan melalui parameter Safety Factor, yang hasilnya disajikan pada Gambar 8. Interpretasi kedua parameter perlu mempertimbangkan sifat kekuatan material dan kriteria kegagalan yang digunakan dalam ANSYS, sehingga hasilnya terbatas pada evaluasi numerik sesuai kondisi simulasi dan tidak secara langsung membuktikan keselamatan komponen dalam penggunaan nyata.

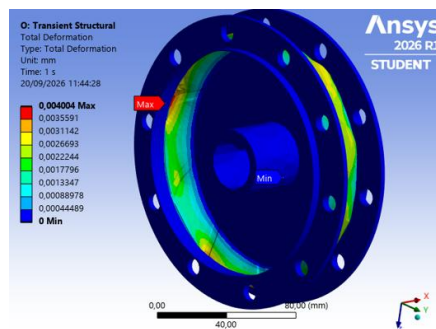


Gambar 8. Grafik perubahan *safety factor* terhadap Kecepatan

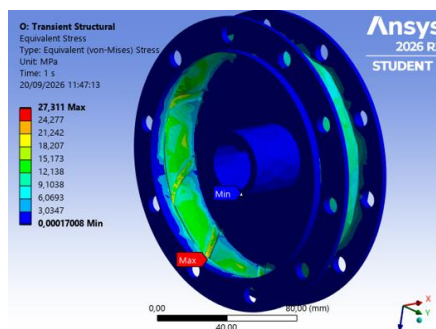
Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai *Safety Factor* cenderung menurun seiring peningkatan kecepatan pengereman pada seluruh konfigurasi rem tromol. Kecenderungan ini sejalan dengan meningkatnya tegangan von Mises pada kecepatan yang lebih tinggi, sehingga margin keamanan numerik terhadap kegagalan material menjadi lebih rendah. Pada kecepatan 100 km/jam, konfigurasi *slant-tapered groove* dengan sudut 28° menghasilkan nilai *Safety Factor* tertinggi, yaitu 2,8569, dibandingkan konfigurasi lainnya. Untuk mengamati distribusi respons termal dan mekanikal secara lebih terperinci, visualisasi kontur temperatur, deformasi total, tegangan von Mises, *Fatigue Life*, dan *Safety Factor* ditampilkan pada konfigurasi tersebut pada kecepatan 100 km/jam (Gambar 9–13).



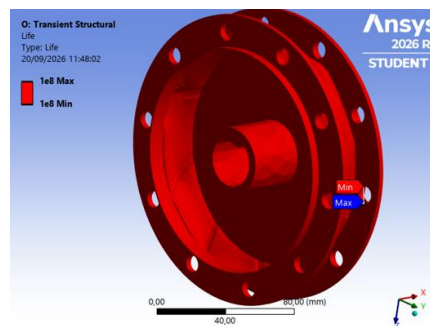
Gambar 9. Distribusi suhu pada *slant tapered groove* pada kecepatan 100 km/jam



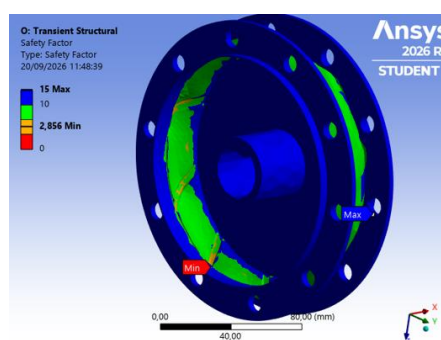
Gambar 10. Deformasi pada *slant tapered groove* pada kecepatan 100 km/jam



Gambar 11. Stress pada *slant tapered groove* pada kecepatan 100 km/jam



Gambar 12. Fatigue Life pada slant tapered groove pada kecepatan 100 km/jam



Gambar 13. Safety Factor pada slant tapered groove pada kecepatan 100 km/jam

Gambar 9–13 digunakan untuk melihat persebaran hasil simulasi pada berbagai bagian rem tromol, sehingga area dengan respons termal dan mekanikal yang berbeda dapat diamati. Visualisasi ini membantu mengidentifikasi lokasi yang mengalami konsentrasi tegangan, perubahan bentuk, serta variasi respons selama pengereman. Selain itu, kontur *Fatigue Life* dan *Safety Factor* memberikan gambaran mengenai sebaran hasil evaluasi kelelahan dan tingkat keamanan berdasarkan model simulasi. Dengan demikian, kelima gambar tersebut melengkapi data numerik dan membantu memahami perilaku konfigurasi *slant-tapered groove* pada kecepatan 100 km/jam.

Pembahasan

1. Pengaruh Kecepatan terhadap Respons Termal dan Mekanikal

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan pengereman dari 40 hingga 100 km/jam diikuti kenaikan temperatur maksimum, deformasi total, dan tegangan von Mises pada seluruh konfigurasi. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa perubahan kondisi pengereman berpengaruh terhadap besarnya beban termal dan respons struktural yang dihitung dalam model. Pada kecepatan 100 km/jam, rentang temperatur maksimum antarkonfigurasi relatif lebih sempit dibandingkan rentang tegangan von Mises maksimum. Dengan demikian, dalam model ini, variasi geometri memperlihatkan perbedaan yang lebih jelas pada respons tegangan daripada pada temperatur maksimum.

Temuan tersebut sejalan dengan pendekatan analisis termal-struktural pada komponen pengereman yang digunakan dalam penelitian Fikri et al. (2025), Choy et al. (2023), dan Utama et al. (2025), yang menempatkan distribusi temperatur dan tegangan sebagai parameter untuk mengevaluasi respons komponen. Penelitian Porlekar dan Kolekar (2025) serta Lei (2025) juga

membahas penggunaan simulasi elemen hingga untuk mengevaluasi respons termomekanik sistem pengereman. Namun, kesamaan pendekatan analisis tidak berarti bahwa hasil numerik penelitian ini identik dengan hasil penelitian tersebut. Perbandingan kuantitatif yang lebih jauh memerlukan kesesuaian material, geometri, kondisi batas, pembebanan, dan pengaturan simulasi yang digunakan masing-masing penelitian.

2. Pengaruh *Fillet* dan *Tapered Groove* terhadap Tegangan

Hasil perbandingan geometri menunjukkan bahwa penambahan *fillet* 0,2 mm menurunkan tegangan maksimum sebesar 10,19% pada konfigurasi *straight-grooved* dan 21,76% pada *slant-grooved*. Konfigurasi *straight-tapered groove* dan *slant-tapered groove* juga menghasilkan tegangan maksimum lebih rendah dibandingkan konfigurasi alur konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa perubahan bentuk transisi dan penampang alur berkaitan dengan distribusi tegangan pada model. Temuan tersebut sejalan secara konseptual dengan penelitian Deressa dan Ambie (2024), Qi et al. (2025), Porlekar dan Kolekar (2026), serta Zhang et al. (2026), tetapi belum membuktikan bahwa mekanisme penurunan tegangan yang sama berlaku pada seluruh konfigurasi penelitian ini.

Pada kecepatan 100 km/jam, konfigurasi *slant-tapered groove* 28° menghasilkan tegangan von Mises maksimum terendah, yaitu 27,311 MPa, dengan *Safety Factor* sebesar 2,8569. Berdasarkan kedua parameter tersebut, konfigurasi ini menunjukkan respons mekanikal terbaik di antara tujuh model yang disimulasikan. Namun, kesimpulan tersebut terbatas pada geometri, material, pembebanan, kondisi batas, dan pengaturan numerik yang digunakan dalam penelitian.

3. Interpretasi *Safety Factor* dan Kriteria Kegagalan

Nilai *Safety Factor* pada Tabel 6 secara umum menurun seiring meningkatnya kecepatan pengereman dan tegangan von Mises. Kecenderungan ini menunjukkan hubungan terbalik antara tegangan yang dihitung dan margin terhadap kriteria kekuatan material. Namun, interpretasi nilai *Safety Factor* perlu mempertimbangkan rumus perhitungan, parameter kekuatan material, dan kriteria kegagalan yang digunakan dalam ANSYS. Hal ini penting karena nilai yang dilaporkan tidak sesuai dengan hasil pembagian sederhana kekuatan tarik material sebesar 240 MPa dengan tegangan von Mises maksimum. Perbedaan tersebut tidak serta-merta menunjukkan kesalahan simulasi karena hasil dapat bergantung pada kriteria kegagalan yang diterapkan. Oleh karena itu, pengaturan analisis perlu diverifikasi dan dasar perhitungannya dijelaskan sebelum nilai *Safety Factor* digunakan untuk menilai tingkat keamanan komponen.

4. Interpretasi *Fatigue Life* dan Batas *Runout*

Seluruh konfigurasi menghasilkan *Fatigue Life* sebesar 1×10^8 siklus, yang merupakan batas tertinggi jumlah siklus pada kurva S–N yang digunakan. Hasil ini menunjukkan bahwa analisis mencapai batas *runout*, sehingga tidak membuktikan bahwa seluruh konfigurasi memiliki umur lelah aktual yang identik atau dapat digunakan untuk menentukan konfigurasi dengan umur lelah paling panjang. Penelitian Luo et al. (2022), Wang et al. (2022), Sathish et al. (2023), dan Sathish et al. (2025) menegaskan relevansi kesesuaian data material dan kondisi pembebanan dalam evaluasi kelelahan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu menggunakan data S–N yang tervalidasi dan sesuai dengan material, memeriksa rasio tegangan serta pengaturan *fatigue analysis* dalam ANSYS, dan melakukan validasi eksperimental apabila hasil digunakan untuk memperkirakan umur lelah komponen aktual.

5. Implikasi dan Keterbatasan Hasil Simulasi

Berdasarkan tegangan von Mises dan *Safety Factor* yang dilaporkan, konfigurasi *slant-tapered groove* 28° menunjukkan respons mekanikal paling baik di antara tujuh model yang disimulasikan. Temuan ini menjadi dasar analitis awal untuk pengembangan desain rem tromol, tetapi penerapannya pada komponen aktual memerlukan validasi eksperimental terhadap temperatur, deformasi, tegangan, dan umur lelah. Hasil penelitian juga memiliki keterbatasan berupa ketergantungan pada ukuran *mesh*, sifat material, kondisi batas, dan kurva S–N. Meskipun perbedaan tegangan antara ukuran *mesh* lokal 0,4 dan 0,6 mm hanya sekitar 1,05%, evaluasi dengan elemen yang lebih halus tetap diperlukan apabila memungkinkan. Selain itu, nilai *Safety Factor* perlu diverifikasi berdasarkan kriteria kegagalan yang diterapkan, sedangkan hasil *Fatigue Life* masih dibatasi oleh nilai *runout* kurva S–N. Dengan demikian, temuan ini sebaiknya dipahami sebagai perbandingan numerik antargeometri, bukan sebagai bukti final mengenai keselamatan dan keandalan rem tromol dalam penggunaan nyata.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, perubahan geometri alur rem tromol memberikan pengaruh lebih nyata terhadap respons mekanikal, khususnya tegangan von Mises dan *Safety Factor*, dibandingkan terhadap temperatur maksimum. Penambahan *fillet* 0,2 mm menurunkan tegangan maksimum sebesar 10,19% pada konfigurasi *straight-grooved* dan 21,76% pada *slant-grooved*, sedangkan modifikasi *tapered groove* menghasilkan penurunan masing-masing sebesar 41,60% dan 43,53%. Pada kecepatan 100 km/jam, konfigurasi *slant-tapered groove* 28° menghasilkan tegangan von Mises maksimum sebesar 27,311 MPa dan *Safety Factor* sebesar 2,8569, sehingga menunjukkan respons mekanikal terbaik di antara tujuh konfigurasi yang disimulasikan. Seluruh konfigurasi menghasilkan *Fatigue Life* sebesar 1×10^8 siklus karena mencapai batas *runout* kurva S–N, sehingga umur lelah antarkonfigurasi belum dapat dibedakan. Dengan demikian, *slant-tapered groove* 28° berpotensi menjadi alternatif modifikasi geometri untuk mengurangi tegangan, tetapi keunggulan kinerja dan keselamatannya dalam penggunaan nyata belum terbukti.

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengujian eksperimental untuk memvalidasi hasil simulasi, memperluas variasi geometri dan kondisi pembebanan, serta menggunakan kurva S–N eksperimental yang sesuai dengan material dan kondisi pembebanan agar perbedaan umur lelah antarkonfigurasi dapat dievaluasi. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi awal bagi perancang dalam mengevaluasi alternatif geometri alur dengan tegangan lebih rendah, tetapi penerapannya pada komponen aktual tetap memerlukan validasi eksperimental dan evaluasi sesuai kondisi operasi yang dituju.

DAFTAR PUSTAKA

- Ayuhikmatin Sekarjati, K., Rusianto, T., Prasetyo, A. B., & Assagaf, I. P. A. (2025). Analisis thermal transient dan static structure pada disc brake berbasis finite element. *Journal of Energy, Materials, & Manufacturing Technology*, 4(2), 99–108. <https://doi.org/10.61844/jemmtec.v4i02.1095>
- Bena, W., Sirata, G., et al. (2022). Coupled thermal stress analysis of Volvo truck disc brake. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, Article 7945264. <https://doi.org/10.1155/2022/7945264>
- Choy, H. Y., Siaw, M. G., & Pung, K. Q. (2023). Design and analysis of brake drum using finite element analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2609(1), Article 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2609/1/012011>

- Deressa, K. T., & Ambie, D. A. (2024). Non-axisymmetric modeling of a moving heat source for thermal stress and fatigue analysis of railway vehicle disc brakes. *Urban Rail Transit*, 10, 42–64. <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00207-z>
- Fikri, H., Sari, D. Y., Waskito, W., & Afnison, W. (2025). Numerical analysis of coupled thermal-mechanical on drum brakes. *Jurnal Vokasi Mekanika (VoMek)*, 7(3), 401–412. <https://doi.org/10.24036/vomek.v7i3.884>
- Khatir, T., Bouchetara, M., Derrar, K., Djafri, M., Khatir, S., & Abdel Wahab, M. (2022). Thermomechanical behavior of brake drums under extreme braking conditions. *Computers, Materials & Continua*, 72(2), 2259–2273. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.020879>
- Lapisa, R., Fernandez, D., Tarihoran, C., Milana, M., Arif, A., Purwantono, P., & Jasman, J. (2022). Experimental study of the effect of brake drum cooling grooves on motorcycle braking performance. *EUREKA: Physics and Engineering*, (3), 69–77. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.001983>
- Lei, Z. (2025). Thermo-mechanical coupling simulation of disc brake under emergency braking and slow braking mode. *Journal of Engineering Mechanics and Machinery*, 10(1), 86–94. <https://doi.org/10.23977/jemm.2025.100110>
- Luo, J., Liu, J., You, Z., & Liu, X. (2022). Fatigue life prediction of brake discs for high-speed trains via thermal stress. *Science Progress*, 105(2). <https://doi.org/10.1177/00368504221102742>
- Meng, D., Zeng, X., Zhang, L., & Li, B. (2025). A novel approach to analyzing thermoelastic behavior of brake disc under the combined action of thermal and mechanical loads. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 224, Article 112155. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.112155>
- Porlekar, S. B., & Kolekar, A. B. (2026). Coupled field-based design optimization brake discs rotor for braking system. *Revista de Metalurgia*, 62(3). <https://doi.org/10.3989/revmetalm.e301.1752>
- Porlekar, S. B., & Kolekar, A. B. (2025). Thermo-mechanical performance evaluation of motorcycle disc brake rotors using finite element analysis. *Revista de Metalurgia*, 61(1). <https://doi.org/10.3989/revmetalm.e278.1715>
- Qi, G., Jiao, P., Du, W., Zhang, Y., & Chen, B. (2025). Simulation and optimization of train brake disc based on coupling characteristics of FEM and thermal flow density method. *Scientific Reports*, 15, Article 40617. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24247-6>
- Qu, J., Wang, W., Dong, Z., & Shan, W. (2022). Simulation analysis and verification of temperature and stress of wheel-mounted brake disc of a high-speed train. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35, Article 99. <https://doi.org/10.1186/s10033-022-00786-1>
- Sathish, K. T., Maniraj, J., Thangarasu, V. S., Sahayaraj, A. F., & GaneshKumar, S. (2025). Strain-controlled thermomechanical fatigue testing of EN-GJL-250 for automotive brake disc application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 239(13), 6511–6521. <https://doi.org/10.1177/09544070241295412>
- Sathish, K. T., Maniraj, J., & Thangarasu, V. S. (2023). Study of friction, wear and plastic deformation of automotive brake disc subjected to thermo-mechanical fatigue. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 28(1), Article e20220329. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0329>

- Schmid, D., Gräbner, N., & von Wagner, U. (2022). Friction-induced noise in drum brakes: Finite-element modeling and experiments with special focus on damping. *Archive of Applied Mechanics*, 92, 2467–2481. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02189-z>
- Utama, A. N. P., Afnison, W., Sari, D. Y., & Rifelino. (2025). Analysis thermal for disc brake using finite element analysis (FEA). *Jurnal Vokasi Mekanika (VoMek)*, 7(2), 267–278. <https://doi.org/10.24036/vomek.v7i2.853>
- Wang, J., Chen, Y., Zuo, L., Zhao, H., & Ma, N. (2022). Evaluation of thermal fatigue life and crack morphology in brake discs of low-alloy steel for high-speed trains. *Materials*, 15(19), Article 6837. <https://doi.org/10.3390/ma15196837>
- Wang, X., Wu, X., & Zuo, J. (2025). Thermal fatigue life prediction of brake disks based on coupled thermal simulation. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 86(21), 7550–7561. <https://doi.org/10.1080/10407782.2024.2352172>
- Zhang, W., Geng, Y., Shan, Y., Liu, X., & Pang, S. (2026). Simulation and optimisation of commercial vehicle brake disc based on thermal-structural coupling characteristic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 240(5), 3044–3065. <https://doi.org/10.1177/09544070251333006>