

SIMULASI DAN ANALISIS DARI DESAIN LUBANG SLOTS LURUS VARIASI ASIMETRIS

***Abraham Sahala Parluhutan Hutaauruk¹, Budi Setiyana², Muchammad²**

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: parluhutans23@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan mengembangkan desain cakram rem mobil dengan variasi lubang dan celah guna memperoleh performa optimal dalam hal kekuatan struktur dan distribusi termal. Variasi desain diuji menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*) melalui perangkat lunak Ansys 2024 R2. Model cakram dimodelkan dengan *SolidWorks* 2021 dan menggunakan material *gray cast iron*. Analisis dilakukan terhadap empat variasi desain awal dengan luas lubang yang sama, terdiri dari dua tipe lubang (lingkaran) dan dua tipe celah (garis), yang kemudian dibandingkan berdasarkan hasil distribusi tegangan dan temperatur. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain celah lurus memberikan performa termal dan struktural yang lebih baik dibanding desain lainnya. Desain terbaik tersebut kemudian dikembangkan lebih lanjut untuk menghasilkan performa yang lebih optimal. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan cakram rem mobil yang efisien dan andal, khususnya dalam meningkatkan kemampuan disipasi panas dan ketahanan strukturalnya.

Kata kunci : celah; *disc brake*; distribusi termal; *finite element analysis*; kekuatan struktur; lubang

Abstract

This study aims to analyze and develop the design of car brake discs with variations in holes and gaps to obtain optimal performance in terms of structural strength and thermal distribution. The design variations were tested using the finite element method through Ansys 2024 R2 software. The disc model was modeled with SolidWorks 2021 and used gray cast iron material. Four initial design variations with the same hole area, consisting of two hole types (circles) and two gap types (lines), were analyzed and compared based on the stress and temperature distribution results. Simulation results showed that the straight slit design provided better thermal and structural performance than the other designs. The best design was then further developed to produce more optimal performance. This research is expected to be a reference in the development of efficient and reliable automobile brake discs, especially in improving their heat dissipation capability and structural durability.

Keywords: *disc brake*; *finite element analysis*; *gap*; *hole*; *structural strength*; *thermal distribution*

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi di industri otomotif mendorong peningkatan performa sistem pengereman, khususnya rem cakram (*disc brake*) yang digunakan secara luas karena efisiensinya dan kestabilannya. Tentunya rem sangat penting untuk keamanan dan keselamatan kita dalam berkendara karena dikutip dari salah satu website berita bahwa pada tahun 2024 80% kecelakaan di jalan raya diakibatkan oleh rem blong yang tentunya sangat disayangkan dan harus kita teliti serta kembangkan untuk rem kendaraan-kendaraan umum yang digunakan seperti mobil dan motor[1]. Rem cakram bekerja dengan mengubah energi kinetik menjadi panas melalui gesekan, sehingga desain yang mampu melepas panas secara efektif sangat diperlukan untuk mencegah kegagalan fungsi rem. Salah satu inovasi yang umum diterapkan adalah penambahan lubang atau celah (ventilasi) untuk meningkatkan pembuangan panas, namun modifikasi ini juga mempengaruhi kekuatan struktural cakram. Oleh karena itu, diperlukan analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (FEM) untuk mengevaluasi pengaruh variasi desain lubang terhadap distribusi tegangan dan temperatur, agar diperoleh desain yang optimal dari sisi termal dan mekanik.

2. Landasan Teori

Dalam industri otomotif, khususnya pada kendaraan bermotor, terdapat berbagai komponen vital yang memerlukan perhatian khusus dari para produsen kendaraan, seperti rangka kendaraan, bodi, sistem penggerak, motor penggerak, sistem kelistrikan, dan komponen lainnya. Salah satu aspek krusial yang membutuhkan perencanaan dan perancangan yang sangat teliti adalah sistem rem. Sistem rem pada kendaraan bermotor merupakan komponen fundamental yang

memiliki peran vital bagi keamanan berkendara. Sistem rem ini harus mampu memperlambat laju atau menghentikan kendaraan secara aman dan terkendali, baik saat melaju di jalur lurus maupun saat menikung, dalam berbagai kondisi kecepatan yang beragam [2].

Dalam sistem rem cakram kendaraan, proses pengereman bukan hanya berfungsi untuk mengurangi kecepatan kendaraan, namun juga menghasilkan panas sebagai konsekuensi dari friksi yang terjadi antara pad rem dan cakram rem. Dengan demikian, manajemen termal menjadi aspek krusial untuk memastikan sistem rem dapat beroperasi dengan efektif dan aman sepanjang penggunaannya. Ketika proses pengereman berlangsung, energi kinetik dari kendaraan mengalami transformasi menjadi energi termal yang kemudian didistribusikan ke lingkungan sekitar melalui area permukaan cakram dan pad rem. [3].

Secara keseluruhan, rem cakram berfungsi untuk menurunkan laju kendaraan melalui friksi yang terjadi antara pad rem dan cakram dengan memanfaatkan bantuan kaliper. Bahan dasar cakram umumnya terbuat dari besi tuang, walaupun pada aplikasi tertentu dapat menggunakan material komposit sebagai alternatif. Persentuhan antara cakram dan pad menghasilkan perpindahan panas (*heat flux*) yang dipengaruhi oleh variabel waktu dan posisi kontak. Pada area di luar zona kontak, kondisi batas termal sistem ini melibatkan proses konveksi, radiasi, serta pola distribusi temperatur yang spesifik. Kecepatan sliding dan aliran panas yang dihasilkan dari gesekan umumnya mengalami perubahan seiring berjalannya waktu dan memiliki korelasi yang erat dengan peningkatan tekanan operasional [4].

Selama pengereman berlangsung, intensitas panas antara *brake pad* dan area kontak cakram terjadi karena deformasi mikroplastik yang diakibatkan oleh gaya gesekan. Pemanasan merupakan manifestasi dari perubahan energi mekanik menjadi energi kalori. *Heat flux* pada komponen sistem rem dapat diketahui dengan membagi laju energi panas dengan luas permukaan kontak komponen [5].

3. Bahan dan Metode Penelitian

3.1 Pemodelan Geometri

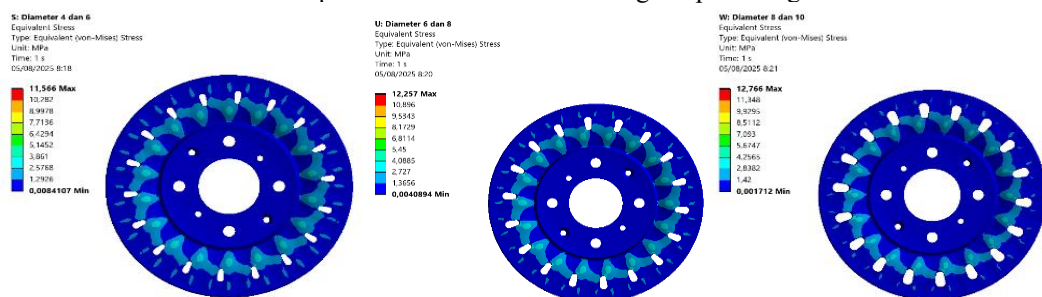
Perancangan dan simulasi rem cakram mobil x ini dimulai dengan pemodelan 3D di SOLIDWORKS 2022, mencakup rotornya dengan dimensi yang sudah diukur secara langsung. Geometri kemudian di-*export* menuju Ansys Structural 2024R2 untuk dilakukan langkah selanjutnya yaitu *meshing* dan penyetelan *boundary condition* [7].

3.2 Pemodelan Meshing dan Boundary Condition

Pengaturan *boundary condition* pada penelitian ini didasarkan oleh simulasi numerik yang dilakukan oleh Park et al dan juga Dubale et al, untuk menghindari perhitungan terpengaruh oleh *boundary condition* [6]. Untuk bagian yang diberikan perlakuan selayaknya ada *brake pad* yang menekan untuk memberikan tekanan dan juga distribusi panas sudah dibuat, dalam penelitian kali ini seperti diberi lintasan jalur *brake pad* akan menekan rem cakrahnya. *Mesh* yang peneliti gunakan untuk menjadi *input* pada Ansys adalah tipe Tetrahedron dengan patch independent dan menggunakan beberapa tipe *body sizing* dan *face sizing* [10]. Jumlah mesh total untuk perhitungan numerik ini adalah sekitar 88 ribu elements dan mempercepat proses simulasi namun dengan hasil yang tentunya sudah konvergen. Pengaturan *boundary condition* diawali dengan pemilihan metode atau tipe simulasi dalam Ansys yang disebut *Static Structural* dimana dari metode ini kita akan menentukan Von Mises Stress nya dari input yang kita berikan berupa *pressure*, *rotational velocity*, dan juga *fixed support*. Untuk *pressure* sendiri kita gunakan 0,44 Mpa dan *rotational velocity* yang kita gunakan adalah sebesar 76,14 rad/s [8]. Untuk simulasi yang kedua kita gunakan *transient thermal* karena kita akan seakan” merekayasa rem cakram tersebut sedang benar-benar menerima panas dari tekanan *brake pad* dimana kita beri input untuk *boundary condition* nya adalah convection dan juga heat flux. Untuk besarnya sendiri convection itu 44,271 W/m². °C dan heat fluxnya adalah $q_2(t) = 0,134 \times 10^6 * (1 - \frac{t}{6})$. Diasumsikan rem berlangsung selama 6 detik dan itu kita berikan inputnya kedalam analysis settings [9]. Kurang lebihnya itu dan dari kedua simulasi tadi dari *static structural* kita mencari *Von Misses Stress* dan untuk *transient thermal* yang kita cari adalah nilai temperatur.

4. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini kita menggunakan salah satu variasi yang sangat berbeda dari biasanya dimana kita akan menggunakan variasi diameter asimetris pada rem cakram mobil x dengan tipe lubang slots lurus.

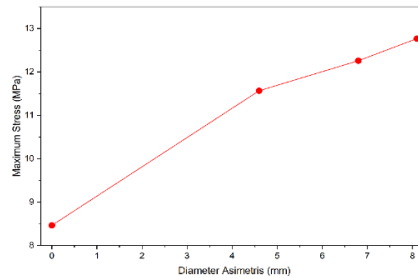


Gambar 1. Distribusi tegangan pada variasi diameter asimetris pada lubang rem cakram

Tabel 1. Nilai maximum stress dengan variasi diameter asimetris lubang

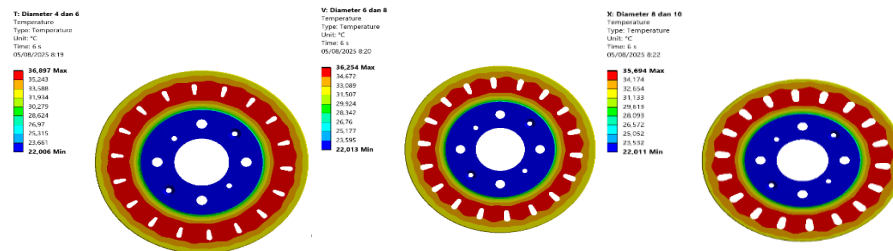
Diameter	Panjang	Maximum Stress (MPa)
4 dan 6 mm	9,5 mm	11,566
6 dan 8 mm	9,5 mm	12,257
8 dan 10 mm	9,5 mm	12,766

Berdasarkan data hasil simulasi, nilai *maximum stress* meningkat seiring bertambahnya ukuran diameter asimetris lubang. Nilai *stress* terendah ditemukan pada variasi diameter lubang (4 dan 6 mm) dengan panjang 9,5 mm, yaitu sebesar 11,566 MPa. Peningkatan diameter asimetris menjadi (6 dan 8 mm) menghasilkan *maximum stress* sebesar 12,257 MPa, dan pada diameter asimetris lubang (8 dan 10 mm), nilai *maximum stress* tertinggi tercatat sebesar 12,766 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan diameter lubang yang asimetris menyebabkan peningkatan *maximum stress* secara keseluruhan. Grafik perbandingan nilai maximum stress pada pemberian variasi diameter simetris dapat kita lihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Pengaruh pemberian variasi diameter asimetris pada lubang terhadap tegangan

Berikutnya setelah kita melakukan simulasi struktural untuk melihat hasil maximum stress dari masing-masing variasi diameter asimetris lubang, mari kita lihat pada Gambar 3 dan Tabel 2 untuk distribusi panasnya yang memakai acuan temperatur.

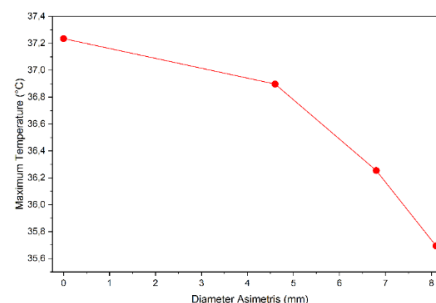


Gambar 3. Distribusi temperatur pada variasi diameter asimetris lubang slots lurus

Tabel 2. Nilai Maksimum temperatur variasi diameter asimetris lubang

Diameter	Panjang	Maximum Temperature (°C)
4 dan 6 mm	9,5 mm	36,897
6 dan 8 mm	9,5 mm	36,254
8 dan 10 mm	9,5 mm	35,694

Berdasarkan hasil simulasi termal menggunakan fitur *Transient Thermal*, terlihat bahwa peningkatan ukuran diameter lubang secara asimetris berdampak pada penurunan temperatur maksimum yang terjadi pada piringan rem. Pada diameter (4 dan 6 mm), temperatur maksimum yang tercatat adalah sebesar 36,897 °C. Ketika diameter ditambah menjadi (6 dan 8) mm, temperatur maksimum menurun menjadi 36,254 °C, dan penurunan paling signifikan terjadi pada diameter asimetris dengan ukuran (8 dan 10) mm, yaitu sebesar 35,694 °C. Grafik perbandingan nilai temperatur maksimal pada pemberian variasi diameter asimetris dapat kita lihat pada Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Grafik pengaruh pemberian variasi diameter asimetris pada lubang terhadap temperature

Penurunan temperatur maksimum ini menunjukkan bahwa cakram dengan lubang yang lebih besar memiliki efisiensi pelepasan panas yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh peningkatan luas permukaan total lubang yang mendukung proses konveksi, sehingga memungkinkan cakram untuk melepaskan panas ke udara sekitar dengan lebih efektif. Selain itu, lubang yang lebih besar juga memberikan jalur aliran udara yang lebih efisien, mempercepat pendinginan terutama di area-area yang terpapar panas langsung akibat gesekan.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dipaparkan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut untuk menjawab rumusan masalah penelitian:

1. Perilaku Cakram terhadap Pembebanan Pengereman, dari hasil simulasi *static structural*, diperoleh bahwa cakram rem mobil mengalami tegangan yang tersebar terutama di sekitar area lubang dan kontak kampas rem. Perilaku ini menggambarkan bahwa geometri desain memegang peran penting dalam menyebarkan beban secara merata. Nilai von Mises stress tertinggi terjadi pada desain dengan lubang tipe hole miring, sementara nilai tegangan terendah diperoleh pada desain slots lurus, yang menunjukkan performa struktural terbaik dalam menahan beban pengereman.
2. Diameter asimetris menghasilkan tren serupa: tegangan meningkat (hingga 12,766 MPa), namun pendinginan lebih efisien (temperatur minimum 35,694 °C).

6. Daftar Pustaka

- [1] <https://bisnisnews.id/detail/berita/80-persen-kecelakaan-di-jalan-raja--akibat-rem-blong--12-ribu-orang--tewas-pengemudi-ceroboh>
- [2] Dafik Prayoga, B., Poernomo, H., Fipka Bisono, dan, Studi Teknik Desain dan Manufaktur, P., Teknik Permesinan Kapal, J., Perkapalan Negeri Surabaya, P., kunci, K., & Roda Tiga, M. (2018). Perancangan Dan Analisis Sistem Pengereman Hydraulic Pada Mobil Minimalis Roda Tiga.
- [3] Najmi, H., Kumar, N., Himanshu, Singh, A., Singh, R., & Kumar, S. (2021). Thermal Analysis Of Brake Disc Of An Automobile. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1116(1), 012146. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1116/1/012146>.
- [4] Singh Dhakar, P., Singh Thakur, A., & Dhakad, A. P. (2018). Thermal Analysis of Disc brake Using ANSYS. International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science (IJTIMES) Impact, 4(6). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20351.97441>
- [5] Dubale, H., Paramasivam, V., Gardie, E., Tefera Chekol, E., & Selvaraj, S. K. (2021). Numerical Investigation Of Thermo-Mechanical Properties For Disc Brake Using Light Commercial Vehicle. Materials Today: Proceedings, 46, 7548–7555. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.437>
- [6] Park, S., Lee, K., Kim, S., & Kim, J. (2022). Brake-Disc Holes and Slit Shape Design to Improve Heat Dissipation Performance and Structural Stability. Applied Sciences, 12(3), 12. <https://doi.org/10.3390/app12031171>
- [7] Rashid, A. (2014). Overview of disc brakes and related phenomena - A review. In International Journal of Vehicle Noise and Vibration (Vol. 10, Issue 4, pp. 257–301). Inderscience Publishers. <https://doi.org/10.1504/IJVNV.2014.065634>
- [8] Struktur, A., Dengan, B., Hingga, M. E., Fadhli Bargess, M., Lesmana, C., & Yussac Tallar, R. (2009). ANALISIS STRUKTUR BENDUNG DENGAN METODE ELEMEN HINGGA.
- [9] Mazidi, H., Jalalifar, S., Jalalifar, S., & Chakho, J. (2011b). Mathematical Modeling Of Heat Conduction In A Disk Brake System During Braking. Asian Journal of Applied Sciences, 4(2), 119–136. <https://doi.org/10.3923/ajaps.2011.119.136>
- [10] Mackin, T. J., Noe, S. C., Ball, K. J., Bedell, B. C., Bim-Merle, D. P., Bingaman, M. C., Bomleny, D. M., Chemlir, G. J., Clayton, D. B., Evans, H. A., Gau, R., Hart, J. L., Karney, J. S., Kiple, B. P., Kaluga, R. C., Kung, P., Law, A. K., Lim, D., Merema, R. C., ... Zimmerman, R. S. (2000). Thermal Cracking In Disc Brakes. www.elsevier.com/locate/engfailanal