

ANALISIS PENGARUH VARIASI KETEBALAN *TREAD BLOCK* SBR 25 DAN PERFORMA TRIBOLOGI DENGAN MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT METHOD*

*Aufa Driantama¹, Budi Setiyana², Rifky Ismail²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: aufa.driantams@gmail.com

Abstrak

Kinerja tread block sangat dipengaruhi oleh jenis material dan bentuk geometrinya. Selain itu, sifat mekanik material seperti kekakuan, ketahanan aus, dan kemampuan menyerap energi juga menjadi faktor penting yang menentukan seberapa baik tread block dapat mempertahankan performanya selama masa penggunaan. sehingga perlu dilakukan analisis mendalam untuk memahami performa tribologi. Penelitian ini dilakukan menggunakan pendekatan simulasi numerik berbasis metode finite element untuk menghemat biaya dan waktu uji fisik. Material yang digunakan adalah SBR 25 (styrene-butadiene rubber dengan kandungan karbon hitam 25%), dan variasi ketebalan tread block yang dianalisis adalah 4 mm, 7 mm, dan 10 mm. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Abaqus 2017, dengan kondisi gesekan terhadap permukaan rigid. Model material elastomer dimodelkan menggunakan dua jenis strain energy function (SEF) yaitu Mooney-Rivlin dan Yeoh, yang umum digunakan untuk menggambarkan perilaku hiperelastis. Kecepatan geser dibuat konstan sebesar 150 mm/s diterapkan dalam simulasi, dengan beban tekan sebesar 20 N. Hasil utama dari simulasi ini mencakup distribusi tegangan maksimum, gaya reaksi pada arah vertikal dan horizontal, serta nilai total koefisien gesek.

Kata kunci: abaqus; hyperelastic; mooney-rivlin; sbr 25; yeoh

Abstract

The performance of the tread block is highly influenced by the type of material and its geometry. In addition, the mechanical properties of the material such as stiffness, wear resistance, and energy absorption capability are also important factors that determine how well the tread block can maintain its performance during service life. Therefore, an in-depth analysis is required to understand its tribological performance. This research was carried out using a numerical simulation approach based on the finite element method to reduce the cost and time of physical testing. The material used is SBR 25 (styrene-butadiene rubber with 25% carbon black content), with tread block thickness variations of 4 mm, 7 mm, and 10 mm. The simulation was performed using Abaqus 2017 software, under frictional conditions against a rigid surface. The elastomeric material model was represented using two types of strain energy function (SEF), namely Mooney-Rivlin and Yeoh, which are commonly applied to describe hyperelastic behavior. A constant sliding velocity of 150 mm/s was applied in the simulation, with a normal load of 20 N. The main results of this simulation include the distribution of maximum stress, reaction forces in both vertical and horizontal directions, as well as the total coefficient of friction.

Keywords: abaqus; hyperelastic; mooney-rivlin; sbr 25; yeoh

1. Pendahuluan

Ban kendaraan merupakan salah satu komponen penting yang menentukan keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi berkendara. Bagian utama ban yang berinteraksi langsung dengan permukaan jalan adalah tread block. Komponen ini berperan besar dalam menghasilkan gaya gesek, traksi, serta ketahanan aus. Selama pemakaian, tread block mengalami kontak gesek berulang dengan permukaan jalan sehingga rentan terhadap deformasi dan keausan. Kondisi ini menjadikan analisis perilaku tread block sebagai aspek penting dalam pengembangan desain ban modern. Tribologi sendiri merupakan ilmu yang mempelajari interaksi antara permukaan yang saling bersentuhan, meliputi gaya gesek (*friction*), keausan (*wear*), dan pelumasan (*lubrication*). Dalam konteks ban kendaraan, aspek tribologi berperan penting untuk mengevaluasi kinerja *tread block* terhadap kontak jalan, karena memengaruhi efisiensi energi, daya tahan, serta keselamatan berkendara.

Material yang umum digunakan pada tread block adalah Styrene-Butadiene Rubber (SBR) karena sifat elastis, ketahanan aus, serta kestabilannya pada berbagai kondisi. Salah satu variannya, SBR-25, memiliki kandungan karbon hitam 25% yang dapat meningkatkan kekuatan dan ketahanan abrasi. Akan tetapi, performa kontak gesek tread block tidak hanya ditentukan oleh karakteristik material, melainkan juga oleh ketebalan tread block yang terus berkurang selama masa pakai. Perubahan ketebalan ini dapat memengaruhi distribusi tekanan kontak, deformasi, dan gaya gesek yang terjadi.

Pendekatan numerik berbasis Finite Element Method (FEM) menjadi solusi efektif untuk menganalisis perilaku kontak nonlinier pada material elastomer. Perangkat lunak Abaqus memungkinkan pemodelan material hiperelastis melalui Strain Energy Function (SEF) seperti Mooney-Rivlin dan Yeoh yang mampu merepresentasikan deformasi besar pada karet. Dengan pemodelan numerik ini, variasi ketebalan tread block serta karakteristik material dapat dianalisis secara komprehensif tanpa memerlukan biaya tinggi uji eksperimental.

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh variasi ketebalan tread block SBR-25 (4 mm, 7 mm, dan 10 mm) dan karakteristik material hiperelastis terhadap perilaku kontak gesek pada permukaan rigid. Analisis dilakukan menggunakan Abaqus dengan pembebanan berupa gaya tekan 20 N dan kecepatan geser 150 mm/s. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami respons mekanis tread block serta mendukung perancangan ban dengan performa optimal, khususnya dari aspek keselamatan, daya tahan, dan efisiensi energi.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Elastomer

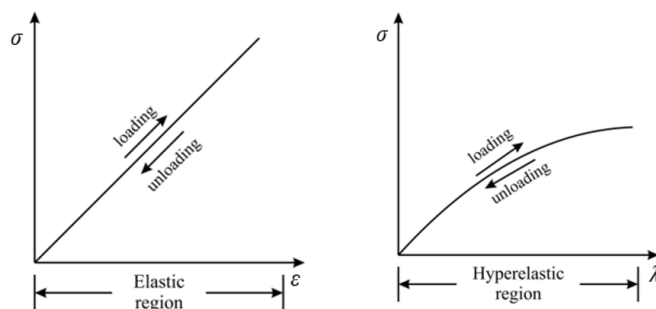
Elastomer merupakan material polimer dengan elastisitas tinggi yang mampu mengalami regangan besar dan kembali ke bentuk semula setelah beban dilepas. Sifat ini berasal dari struktur rantai molekul panjang yang fleksibel, serta ikatan silang hasil proses vulkanisasi yang meningkatkan ketahanan mekanis dan abrasi. Salah satu sifat utama elastomer adalah hiperelastisitas, yaitu kemampuan menahan deformasi besar dengan respons tegangan-regangan nonlinier. Material hiperelastis sering digunakan pada aplikasi ban, seal, dan bantalan karena memiliki ketahanan aus serta kemampuan meredam energi (Wibowo, 2009; Deswita dkk., 2019).

2.2 Styrene-Butadiene Rubber (SBR-25)

Styrene-Butadiene Rubber (SBR) adalah salah satu elastomer sintetis yang paling banyak digunakan, terutama sebagai bahan baku utama pembuatan ban kendaraan. SBR adalah karet sintetis yang berasal dari minyak bumi, merupakan copolymer dari styrena dan butadiene. SBR merupakan kopolimer dari styrena dan butadiena yang memiliki sifat tahan aus, stabil secara kimia, dan harga yang relatif ekonomis. Elastomer ini juga memiliki ketahanan yang baik terhadap abrasi dan penuaan akibat panas, namun kurang tahan terhadap minyak jika dibandingkan dengan NBR. SBR banyak diaplikasikan pada ban, sol sepatu, dan produk karet teknik lainnya (Setiorini, 2020).

2.3 Material Elastic dan Hyperelastic

Material elastis pada umumnya mengikuti hukum Hooke, di mana tegangan berbanding lurus dengan regangan sampai batas proporsional. Contohnya adalah logam yang menunjukkan hubungan linier antara tegangan-regangan pada beban kecil. Sebaliknya, material hiperelastis seperti karet tidak menunjukkan hubungan linier. Kurva tegangan-regangan bersifat nonlinier, namun tetap reversible, sehingga tidak menimbulkan deformasi permanen. Karet juga memiliki rasio Poisson mendekati 0,5, yang berarti hampir tidak mengalami perubahan volume saat terdeformasi. Perbedaan mendasar inilah yang membuat material hiperelastis memerlukan model matematis khusus berupa Strain Energy Function (SEF) untuk mendeskripsikan perilakunya (Gent, 1992).



Gambar 1. Kurva hubungan regangan dan tegangan *elastic* dan *hyperelastic*

2.4 Strain Energy Function (SEF)

Model hiperelastis dalam analisis elemen hingga umumnya direpresentasikan dengan fungsi energi regangan (Strain Energy Function). Dua model yang banyak digunakan adalah Mooney-Rivlin dan Yeoh. Model Mooney-Rivlin mengandalkan invarian regangan pertama dan kedua, sehingga sesuai untuk material inkompresibel dengan deformasi multiaxial. Sedangkan model Yeoh hanya bergantung pada invarian regangan pertama, menjadikannya lebih sederhana namun tetap akurat untuk peregangannya uniaksial besar. Kedua model ini banyak digunakan pada simulasi numerik karet menggunakan Abaqus.

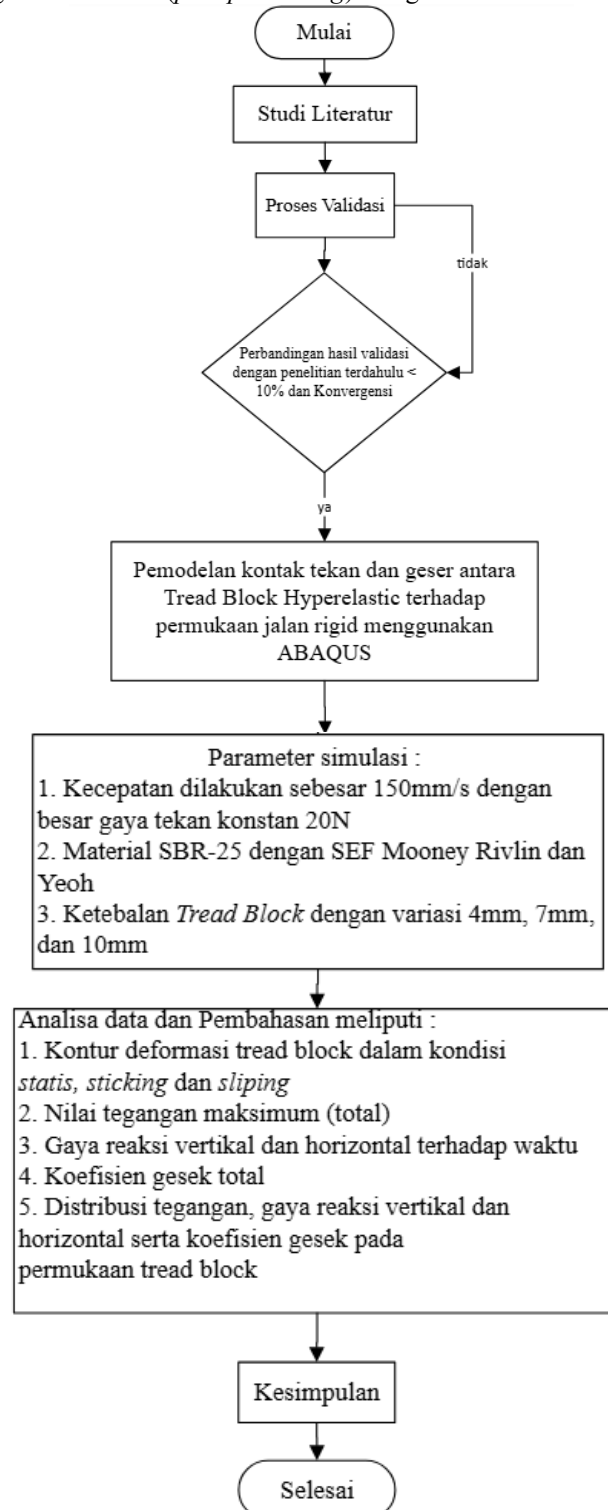
2.5 Mekanisme Kontak Geser Pada Elastomer

Gesekan pada elastomer dipengaruhi oleh adhesi dan deformasi. Selama pergeseran, permukaan elastomer mengalami kondisi *stick-slip*, yaitu sebagian area kontak menempel (*stick*) sementara bagian lain bergeser (*slip*).

Mekanisme ini menyebabkan distribusi tegangan dan gaya gesek tidak merata, sehingga memengaruhi performa traksi dan keausan ban (Gong, 2021).

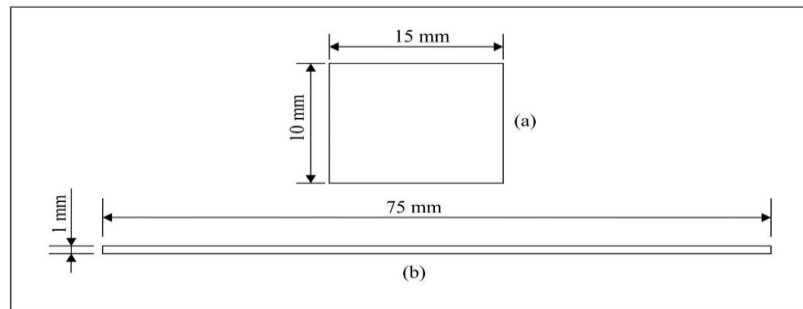
3. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Abaqus 2017. Tahapan penelitian secara umum meliputi pembuatan model geometri, pemberian properti material, penentuan kondisi batas, meshing, solving, hingga analisis hasil (*post-processing*). Diagram alir metodologi ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Metode Penelitian

Objek yang dianalisis berupa tread block berbahan SBR-25 dengan variasi ketebalan 4 mm, 7 mm, dan 10 mm. Tread block dimodelkan berbentuk blok 2D dengan kontak gesek terhadap permukaan rigid road. Sketsa model dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Sketsa (a) tread block (b) Permukaan rigid road

Material SBR-25 dimodelkan sebagai material hiperelastis dengan dua jenis Strain Energy Function (SEF), yaitu Mooney-Rivlin dan Yeoh. Parameter konstanta diperoleh dari hasil uji tarik sebelumnya dan dimasukkan ke dalam modul material Abaqus. Sedangkan permukaan jalan dimodelkan sebagai material rigid dengan modulus elastisitas sangat tinggi.

Tabel 1. Koefisien untuk SEF yeoh

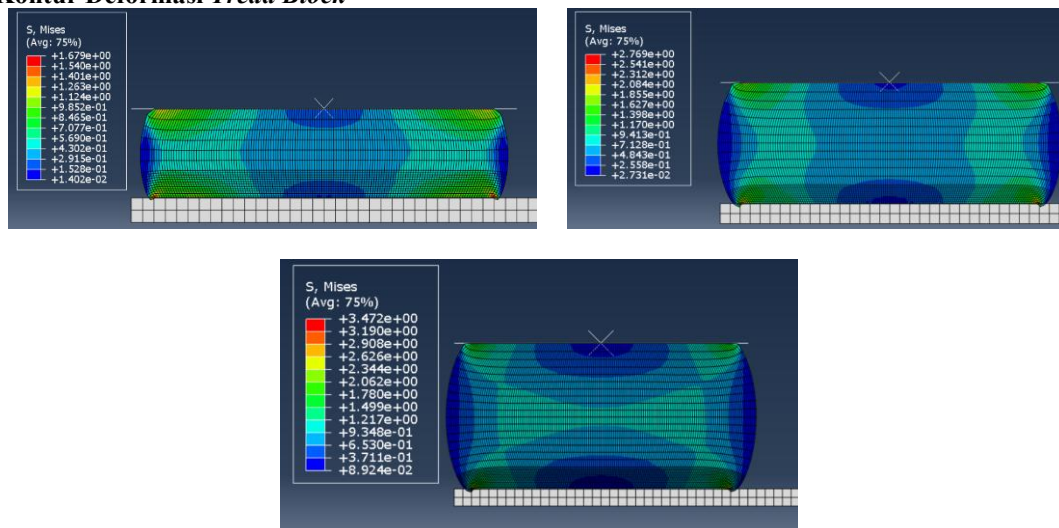
Materials	C10/MPa	C20/MPa	C30/MPa	Dcom/(MPa) ⁻¹	$\rho/10^3 \text{ kgm}^{-3}$
SBR-25	0.337	-0.0053	0.0005	0.062	1.12

Tabel 2. Koefisien untuk SEF Mooney Rivlin

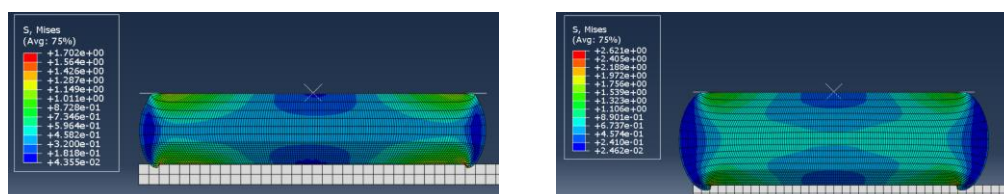
Materials	C ₁₀ /Mpa	C ₀₁ /Mpa	D ₁ /(MPa) ⁻¹	$\rho/10^3 \text{ kgm}^{-3}$
SBR-25	0,1218	0,4881	0,062	1,12

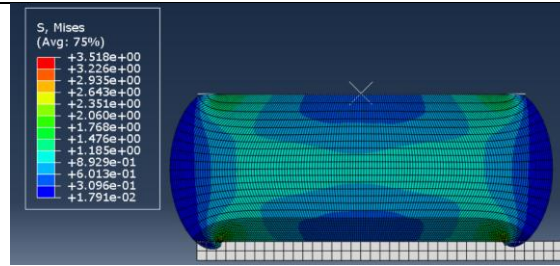
4. Hasil Dan Pembahasan

4.1 Kontur Deformasi Tread Block



Gambar 4. Kontur Deformasi Tread Block dengan SEF Mooney-Rivlin dengan ketebalan tread (a) 4 mm (b) 7 mm (c) 10 mm dalam kondisi statis

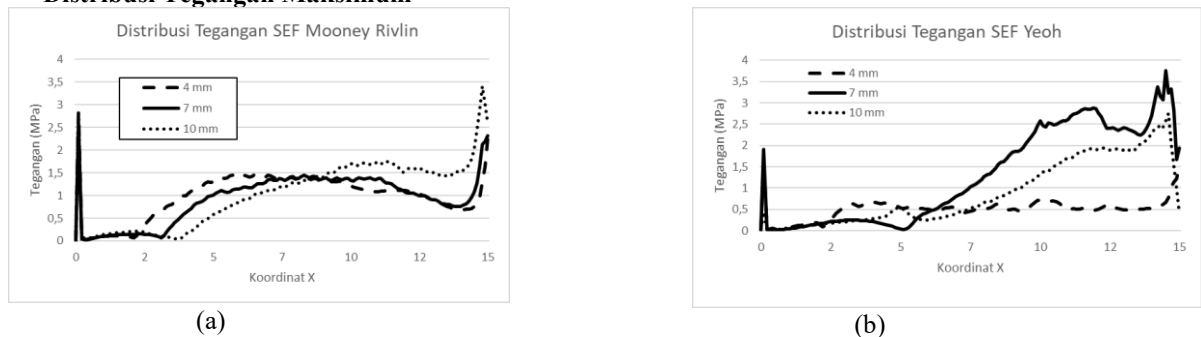




Gambar 5. Kontur Deformasi Tread Block dengan SEF Yeoh dengan ketebalan tread (a) 4 mm (b) 7 mm (c) 10 mm dalam kondisi statis

Hasil simulasi deformasi statis menunjukkan bahwa ketebalan tread block berpengaruh signifikan terhadap respons mekanis. Pada ketebalan 4 mm, deformasi lebih besar dibandingkan 7 mm dan 10 mm, karena geometri tipis memiliki kekakuan lebih rendah. Sebaliknya, tread block dengan ketebalan 10 mm memperlihatkan deformasi yang lebih kecil dan distribusi regangan lebih merata. Perbandingan antara model Mooney-Rivlin dan Yeoh menunjukkan tren hasil yang serupa, meskipun nilai deformasi berbeda tipis.

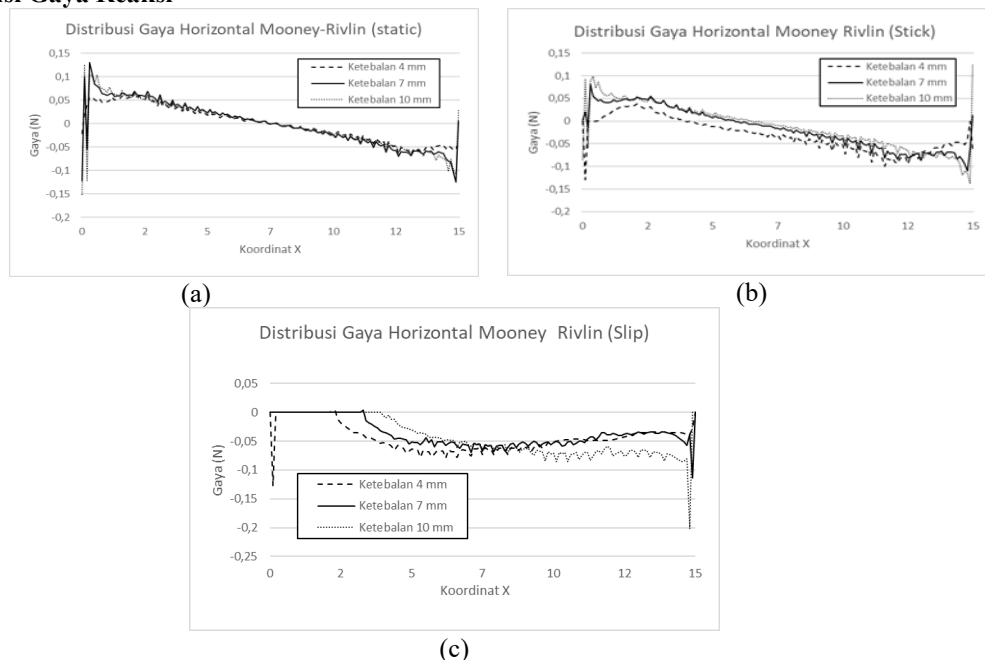
4.2 Distribusi Tegangan Maksimum



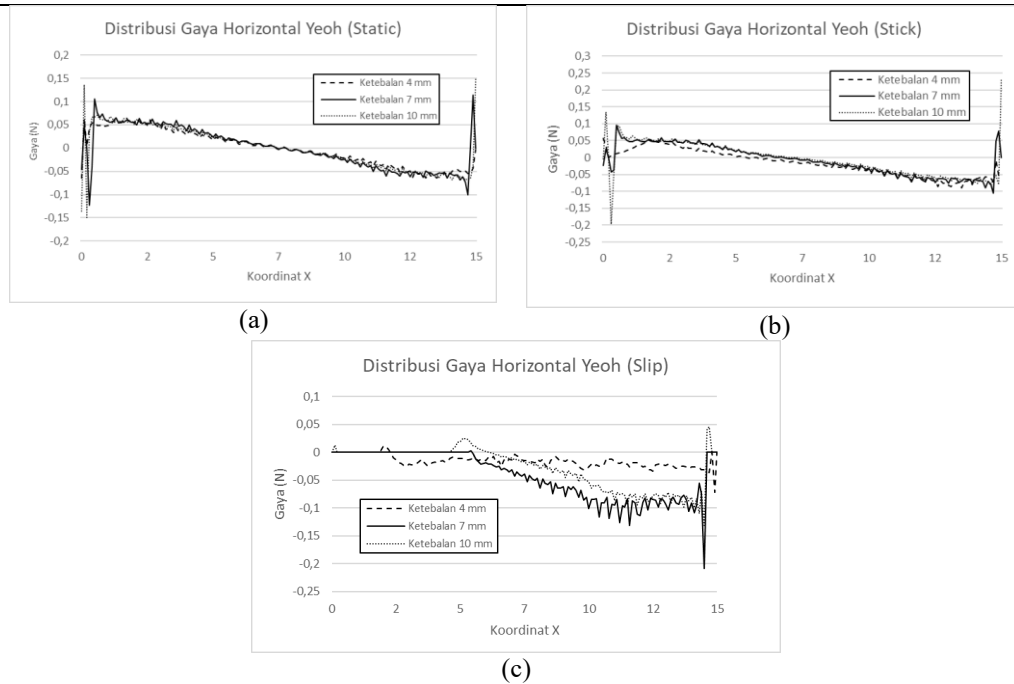
Gambar 6. Distribusi Tegangan dengan variasi SEF (a) Mooney-Rivlin dan (b) Yeoh

Plot tegangan maksimum memperlihatkan bahwa model Mooney-Rivlin menghasilkan nilai tegangan lebih tinggi dibandingkan model Yeoh. Ketebalan tread block juga memengaruhi besarnya tegangan, di mana tread block tipis (4 mm) mengalami konsentrasi tegangan lebih besar pada permukaan bawah dibandingkan tread block tebal (10 mm).

4.3 Distribusi Gaya Reaksi



Gambar 7. Distribusi gaya reaksi horizontal SEF Mooney Rivlin dengan kondisi (a) static (b) stick (c) Slip



Gambar 8. Distribusi gaya reaksi horizontal *SEF Yeoh* dengan kondisi (a) *static* (b) *stick* (c) *Slip*

Distribusi gaya reaksi horizontal dan vertikal memperlihatkan karakteristik yang berbeda pada model Mooney-Rivlin dan Yeoh. Pada SEF Mooney-Rivlin, gaya reaksi horizontal mengalami kenaikan yang lebih tajam ketika *tread block* mulai bergeser. Hal ini menunjukkan bahwa model Mooney-Rivlin lebih sensitif terhadap deformasi geser, sehingga menghasilkan gaya perlawanan yang lebih tinggi. Tegangan internal yang lebih besar dalam model ini menyebabkan energi regangan meningkat, yang kemudian tercermin pada besarnya gaya gesek horizontal.

Sementara itu, pada SEF Yeoh gaya reaksi horizontal cenderung meningkat secara lebih gradual dan stabil. Hal ini disebabkan model Yeoh hanya bergantung pada invarian regangan pertama, sehingga respons material terhadap deformasi geser lebih sederhana. Akibatnya, gaya horizontal yang dihasilkan tidak setinggi pada Mooney-Rivlin, tetapi lebih konsisten sepanjang proses geser.

4.4 Koefisien Gesek Total

Tabel 3. Hasil koefisien gesek total dengan ketebalan *tread block* 4 mm

Kondisi	Koefisien Gesek Total	
	Mooney Rivlin	Yeoh
<i>Static</i>	0	0
<i>Stick</i>	0,902	0,953
<i>Slip</i>	0,646	0,548

Tabel 4. Hasil koefisien gesek total dengan ketebalan *tread block* 7 mm

Kondisi	Koefisien Gesek Total	
	Mooney Rivlin	Yeoh
<i>Static</i>	0	0
<i>Stick</i>	0,924	0,974
<i>Slip</i>	0,614	0,622

Tabel 5. Hasil koefisien gesek total dengan ketebalan *tread block* 10 mm

Kondisi	Koefisien Gesek Total	
	Mooney Rivlin	Yeoh
<i>Static</i>	0	0
<i>Stick</i>	0,924	0,974
<i>Slip</i>	0,614	0,622

<i>Static</i>	0	0
<i>Stick</i>	0,937	0,957
<i>Slip</i>	0,602	0,572

Koefisien gesek hasil simulasi menunjukkan bahwa tread block dengan ketebalan lebih tipis (4 mm) memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan 7 mm dan 10 mm karena area kontak lebih kecil dan distribusi tegangan lebih terkonsentrasi, sedangkan tread block tebal menghasilkan nilai yang lebih rendah akibat distribusi tegangan merata. Perbedaan model hiperelastis juga terlihat, di mana Mooney-Rivlin cenderung memberikan koefisien gesek sedikit lebih tinggi karena menghasilkan gaya horizontal yang lebih besar, sedangkan Yeoh menunjukkan tren lebih stabil dengan nilai lebih rendah namun konsisten. Hal ini menegaskan bahwa tread block tipis memberikan traksi lebih tinggi tetapi lebih cepat aus, sementara tread block tebal lebih tahan lama dengan konsekuensi penurunan traksi.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi tersebut diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Kontur tegangan dan deformasi *tread block* menunjukkan bahwa variasi ketebalan memengaruhi pola deformasi dan distribusi tegangan. Tread block dengan ketebalan 4 mm lebih kaku sehingga menghasilkan konsentrasi tegangan lebih tinggi, sedangkan tread block 10 mm mengalami deformasi lebih besar dengan distribusi tegangan yang lebih merata.
2. Nilai tegangan maksimum diperoleh pada area kontak yang mengalami konsentrasi beban tertinggi. Variasi ketebalan memengaruhi besar kecilnya tegangan, di mana tread block tipis cenderung menghasilkan tegangan maksimum yang lebih besar akibat keterbatasan dalam menyebarkan beban.
3. Distribusi tegangan pada permukaan kontak menunjukkan bahwa semakin tebal tread block, tegangan yang terdistribusi di permukaan cenderung lebih merata, meskipun deformasi yang terjadi lebih besar. Hal ini menunjukkan adanya trade-off antara kekakuan dan fleksibilitas material.
4. Distribusi gaya reaksi horizontal dan vertikal memperlihatkan bahwa gaya normal (ΣF_v) tetap konstan sebesar 20 N, sementara gaya gesek horizontal (ΣF_h) bervariasi mengikuti deformasi. Hal ini berpengaruh langsung pada nilai koefisien gesek yang diperoleh.
5. Koefisien gesek total menunjukkan tren bahwa nilai stick selalu lebih tinggi dibanding slip, sesuai teori tribologi di mana $\mu_{stick} > \mu_{slip}$. Variasi ketebalan tidak selalu meningkatkan koefisien gesek, bahkan pada fase slip cenderung menurun seiring bertambahnya ketebalan tread block. Model Mooney–Rivlin dan Yeoh memberikan hasil yang konsisten, dengan perbedaan nilai yang relatif kecil.

6. Daftar Pustaka

- [1] Badan Pusat Statistik (2016) 'Produksi Karet di Indonesia .', pp. 1–9.
- [2] Bhusan, B. (2013) *Introduction to Tribology*. 2nd editio. Wiley.
- [3] Danesworo, D., Setiyana, B. and ... (2021) 'Investigasi Dampak Beban Pada Kontak Gesek Tread Block Sbr 25 Pada Permukaan Rigid Dengan Metode Finite Element', *Jurnal Teknik ...*, 9(4), pp. 577–590. Available at: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/36656>.
- [4] Fish, Jacob; Belytschko, T. (2007) *A First Course in Finite Elements*. ohn Wiley & Sons Ltd. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470510858>.
- [5] Gent, A.N. (1992) *Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components*. Hanser Publishers.
- [6] Gong, X. (2021) 'Effect of SBR/BR blend ratio on the mechanical properties and wet traction of winter tire tread compounds', *Polymer Testing*, 95, p. 107024. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107024>.
- [7] Isworo, Hajar; Ansyah, P.R. (2018) *Metode Elemen Hingga HMKB654*. Universitas Lambung Mangkurat. Available at: https://mesin.ulm.ac.id/assets/dist/bahan/MEH_Buku_Ajar_full.pdf.
- [8] Khoirudin, A. *et al.* (2022) 'PERMUKAAN TERABRASI DARI MATERIAL KARET MENGGUNAKAN SOFTWARE', 10(4), pp. 513–522.
- [9] Moaveni, S. (2011) *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*. 3rd Editio. Pearson.
- [10] Setiorini, I.A. (2020) 'K Karakteristik Termoplastik Elastomer Dari Karet Alam Dan Polipropilena Dengan Penambahan Carbon Black Filler', *Jurnal Teknik Patra Akademika*, 10(02), pp. 41–44. Available at: <https://doi.org/10.52506/jtpa.v10i02.93>.
- [11] Sitompul, A. (2020) 'Implementasi Pengenalan Jenis Pola Tapak Ban (Tread) Menggunakan Metode Local Binary Patterns', *Jurnal Sistem Komputer dan Informatika (JSON)*, 1(3), p. 189. Available at: <https://doi.org/10.30865/json.v1i3.2094>.
- [12] Wang, J.; Li, Y. (2020) 'Optimization of SBR and BR blends for winter tire tread compounds with enhanced wet grip and wear resistance', *Journal of Applied Polymer Science*, 137(21), p. 48658. Available at:

-
- <https://doi.org/10.1002/app.48658>.
- [13] Wibowo, R.D. (2009) 'Analisis Pemodelan Konstitutif Hiperelastis Biderman dan Neo-Hookean Pada Karet Industri PT.Cipta Daya Mandiriinsani Indonesia dan Literatur Jorgen Bergstrom', *Science*, 1(1), p. 2514922.
- [14] Zienkiewicz, Olek C.; Taylor, Robert L.; Zhu, J.Z. (2005) *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. 6th Editio. Butterworth-Heinemann.