

INVESTIGASI PENGARUH VARIASI TEKANAN TREAD BLOCK SBR-25 TERHADAP PERFORMA TRIBOLOGI MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD (FEM)

*Raphael Alfredo Sitinjak¹, 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: raphaelalfredo82@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menganalisis mekanika kontak antara tread block ban berbahan SBR 25 dengan permukaan rigid menggunakan metode elemen hingga, dengan pemodelan sifat hyperelastic melalui Strain Energy Function (SEF) Mooney-Rivlin dan Yeoh. Latar belakang penelitian didasari pentingnya pemahaman fenomena tribologi, khususnya stick-slip, yang berpengaruh terhadap daya cengkeram, stabilitas, dan keselamatan kendaraan. Simulasi dilakukan di Abaqus 2017 dengan geometri tread block 15×10 mm, menggunakan variasi gaya tekan 10 N, 20 N, dan 30 N pada kecepatan geser 150 mm/s. Konstanta material diambil dari literatur, lalu diterapkan dalam model Mooney-Rivlin dan Yeoh untuk membandingkan respons elastomer terhadap variasi beban. Hasil menunjukkan peningkatan gaya tekan meningkatkan tegangan maksimum dan gaya reaksi, dengan Mooney-Rivlin memprediksi tegangan lebih tinggi, sementara Yeoh lebih stabil dengan fluktuasi halus. Nilai koefisien gesek simulasi mendekati input adhesi 0,6, menegaskan konsistensi model. Kesimpulannya, variasi beban memengaruhi signifikan perilaku kontak elastomer, sementara perbedaan model Mooney-Rivlin dan Yeoh memberi variasi prediksi tegangan, di mana Mooney-Rivlin lebih representatif pada beban tinggi dan Yeoh lebih konservatif pada beban menengah-rendah. Penelitian ini diharapkan menjadi referensi dalam pemodelan interaksi ban dengan jalan serta mendukung pengembangan desain ban yang lebih optimal.

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

Abstract

This study analyzes the contact mechanics between a tire tread block made of SBR 25 and a rigid surface using the finite element method, with hyperelastic property modeling through the Mooney-Rivlin and Yeoh Strain Energy Function (SEF). The background of the study is based on the importance of understanding tribological phenomena, especially stick-slip, which affect vehicle grip, stability, and safety. Simulations were conducted in Abaqus 2017 with a 15×10 mm tread block geometry, using compressive force variations of 10 N, 20 N, and 30 N at a sliding speed of 150 mm/s. Material constants were taken from the literature, then applied in the Mooney-Rivlin and Yeoh models to compare the elastomer response to load variations. The results show that increasing compressive force increases the maximum stress and reaction force, with Mooney-Rivlin predicting higher stress, while Yeoh is more stable with smooth fluctuations. The simulated friction coefficient value is close to the adhesion input of 0.6, confirming the consistency of the model. In conclusion, load variations significantly affect elastomer contact behavior, while differences in Mooney-Rivlin and Yeoh models provide variations in stress predictions, with Mooney-Rivlin being more representative at high loads and Yeoh being more conservative at medium-low loads. This research is expected to serve as a reference in modeling tire-road interactions and support the development of more optimal tire designs.

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

1. Pendahuluan

Ban merupakan salah satu komponen terpenting dalam kendaraan karena berfungsi sebagai penghubung utama antara kendaraan dengan jalan. Bagian tapak ban atau tread block berperan langsung dalam menentukan daya cengkeram, stabilitas, kenyamanan, serta aspek keselamatan berkendara. Fenomena tribologi berupa mekanisme stick-slip sangat berpengaruh terhadap interaksi ban dengan jalan, sehingga pemahaman mendalam mengenai mekanika kontak pada tread block perlu dilakukan sebagai dasar pengembangan desain ban yang optimal.

Material Styrene Butadiene Rubber (SBR-25) banyak digunakan pada pembuatan tread block karena memiliki ketahanan aus dan sifat mekanik yang baik. Namun, sifat elastomernya bersifat hyperelastic dan non-linear, sehingga tidak dapat dimodelkan hanya dengan pendekatan elastis linear konvensional. Oleh karena itu, digunakan pendekatan Strain Energy Function (SEF) dengan model Mooney-Rivlin dan Yeoh yang terbukti mampu merepresentasikan perilaku deformasi besar pada material karet.

Penelitian ini menggunakan metode Finite Element Method (FEM) dengan perangkat lunak Abaqus 2017 untuk menganalisis interaksi kontak antara tread block SBR-25 dengan permukaan rigid. Geometri tread block berukuran 15×10 mm dianalisis dengan variasi gaya tekan 10 N, 20 N, dan 30 N pada kecepatan geser konstan 150 mm/s. Parameter utama yang diamati meliputi distribusi tegangan maksimum, gaya reaksi vertikal dan horizontal, serta nilai koefisien gesek, sekaligus membandingkan respons elastomer berdasarkan model material Mooney-Rivlin dan Yeoh.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan gaya tekan meningkatkan tegangan maksimum serta gaya reaksi. Model Mooney-Rivlin memberikan prediksi tegangan lebih tinggi, sedangkan model Yeoh menunjukkan hasil yang lebih stabil dengan fluktuasi halus. Nilai koefisien gesek mendekati input adhesi 0,6, yang menunjukkan konsistensi pemodelan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi beban berpengaruh signifikan terhadap perilaku kontak elastomer, sementara pemilihan model SEF memengaruhi akurasi prediksi tegangan. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pemodelan interaksi ban dengan jalan serta mendukung pengembangan desain ban yang lebih aman dan efisien.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Elastomer

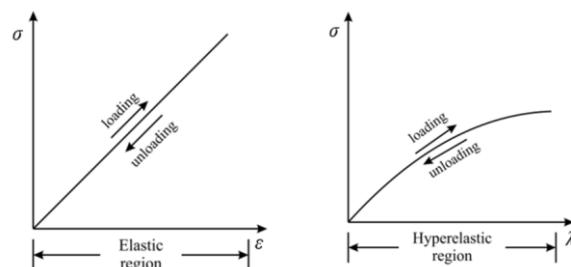
Elastomer merupakan kelompok material polimer yang mampu mengalami peregangan hingga dua kali lipat dari panjang awalnya tanpa menimbulkan deformasi permanen yang signifikan. Pemilihan elastomer umumnya didasarkan pada tingkat kekerasan dan kemampuan material dalam menyerap energi. Material ini banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pada sektor otomotif, bumper, serta sistem perpipaan industri. Elastomer dapat diproduksi dari material termoplastik maupun termoset, dan biasanya proses pengujian serta pengelompokannya berbeda dengan material yang bersifat kaku (McKeen, 2012).

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 styrene dan butadiene. SBR merupakan kopolimer dari stirena 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 tegaangan *elastic* dan *hyperelastic*

2.4 Strain Energy Function (SEF)

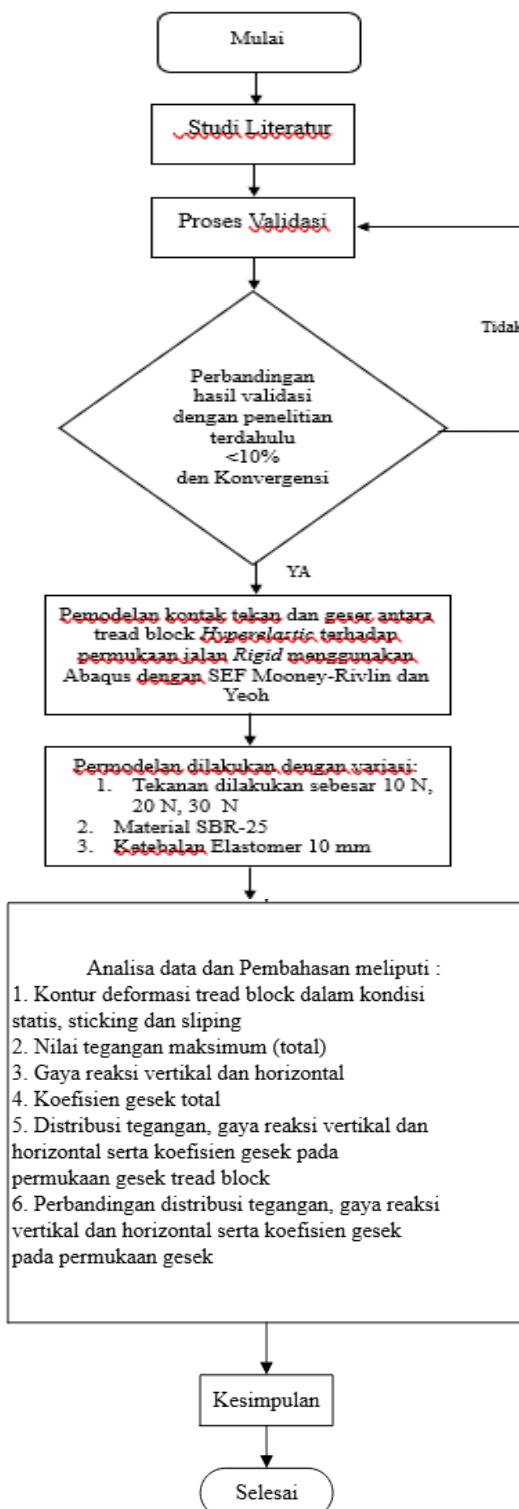
Material hyperelastis, seperti karet, banyak digunakan dalam berbagai aplikasi struktural di berbagai sektor industri, mulai dari pembuatan ban hingga bidang kedirgantaraan. Salah satu sifat unggulan karet adalah kemampuannya untuk mengalami deformasi besar dengan beban yang relatif kecil, sekaligus mampu kembali ke bentuk awal tanpa mengalami deformasi permanen yang signifikan setelah beban dihilangkan. Perilaku tegangan-regangan pada material hyperelastis bersifat sangat non-linier, sehingga penggunaan modulus elastisitas sederhana tidak lagi memadai. Oleh karena itu, karakterisasi perilaku elastis dari material non-linier yang dapat mengalami regangan besar menjadi sangat penting (Shahzad dkk., 2015).

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).

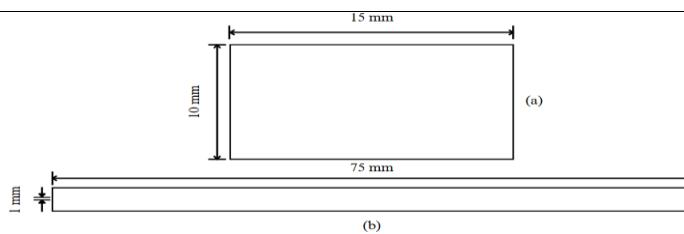
3. Metodologi Penelitian

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 penekanan 10 N, 20 N, dan 30 N. 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

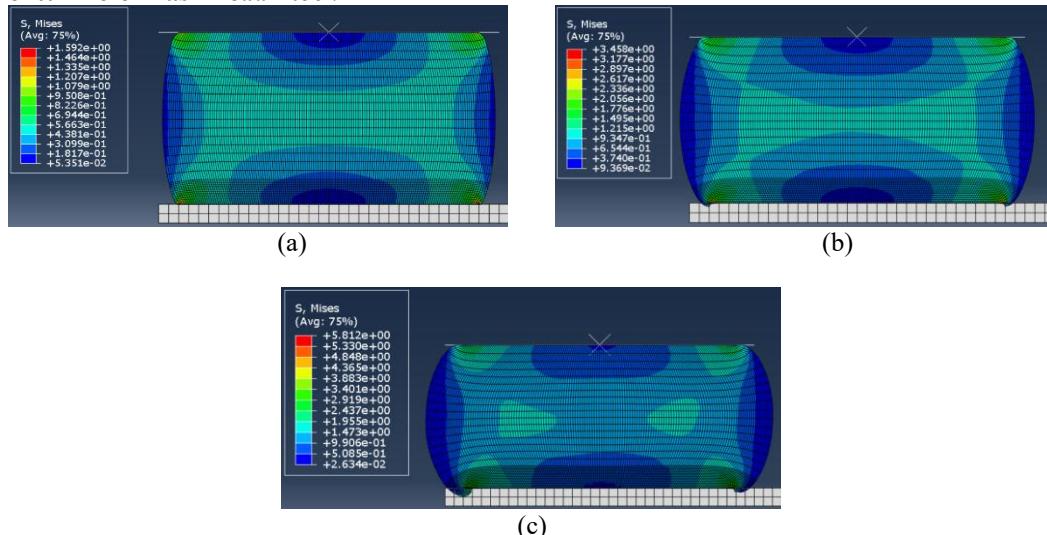
Material SBR-25 dimodelkan sebagai material hiperelastis dengan dua jenis Strain Energy Function (SEF), yaitu Mooney-Rivlin dan Yeoh. Parameter konstanta diperoleh dari hasil uji tarik sebelumnya dan dimasukkan ke dalam modul material Abaqus. Sedangkan permukaan jalan dimodelkan sebagai material rigid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

Tabel 1. Koefisien SBR 25 untuk SEF Mooney-Rivlin dan Yeoh

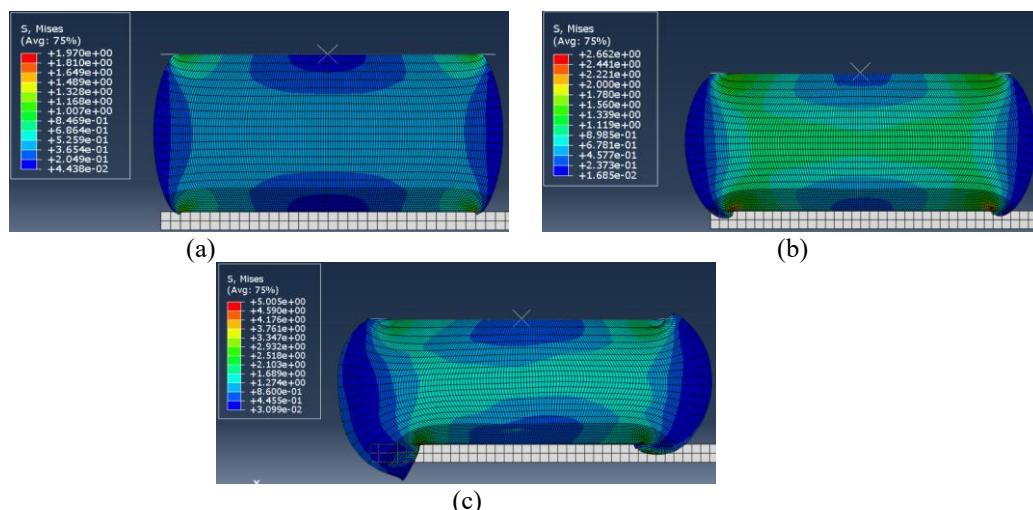
SEF	c_{10}/Mpa	c_{01}/Mpa	$D_1/(\text{MPa})^{-1}$	$\rho/10^3 \text{kgm}^{-3}$
Mooney-Rivlin	0,1218	0,4881	0,062	1,12
Yeoh	0,337	-0,0053	0,0005	1,12

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Kontur Deformasi Tread Block



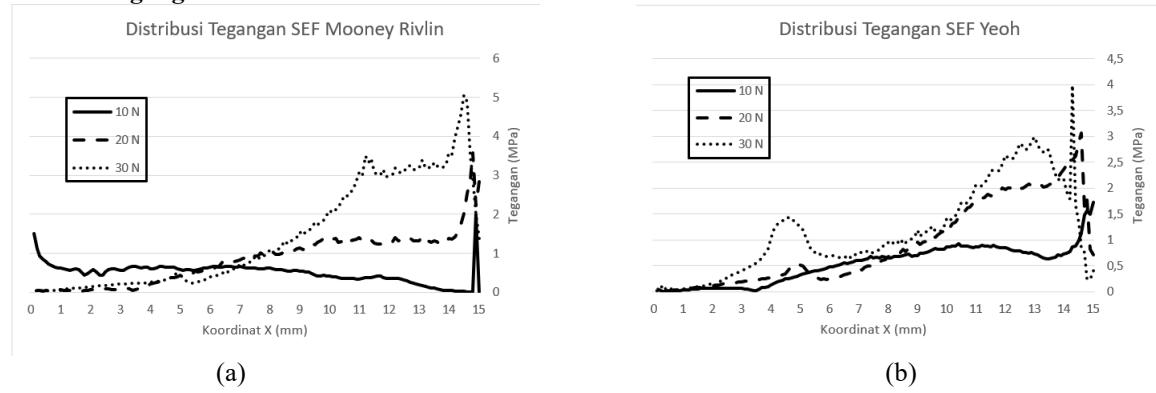
Gambar 4. Kontur Deformasi Tread Block dengan SEF Mooney-Rivlin dengan tekanan (a) 10 N (b) 20 N (c) 30 N dalam kondisi statis



Gambar 5. Kontur Deformasi Tread Block dengan SEF Yeoh dengan tekanan (a) 10 N (b) 20 N (c) 30 N dalam kondisi statis

Hasil simulasi memperlihatkan bahwa peningkatan gaya tekan dari 10 N hingga 30 N secara konsisten meningkatkan deformasi dan tegangan maksimum pada tread block. Pada model Mooney-Rivlin, prediksi tegangan menunjukkan nilai lebih tinggi dengan konsentrasi dominan pada area tepi kontak, sedangkan model Yeoh menghasilkan distribusi tegangan yang lebih stabil dan merata dengan nilai maksimum relatif lebih rendah. Kedua model menunjukkan tren serupa, yakni semakin besar beban maka semakin luas area kontak dan semakin tinggi tegangan yang terbentuk. Perbedaan utama terletak pada karakteristik respons elastomer, dimana Mooney-Rivlin lebih sesuai dalam menggambarkan perilaku pada beban tinggi, sedangkan Yeoh lebih konsisten dalam memodelkan kondisi beban menengah hingga rendah.

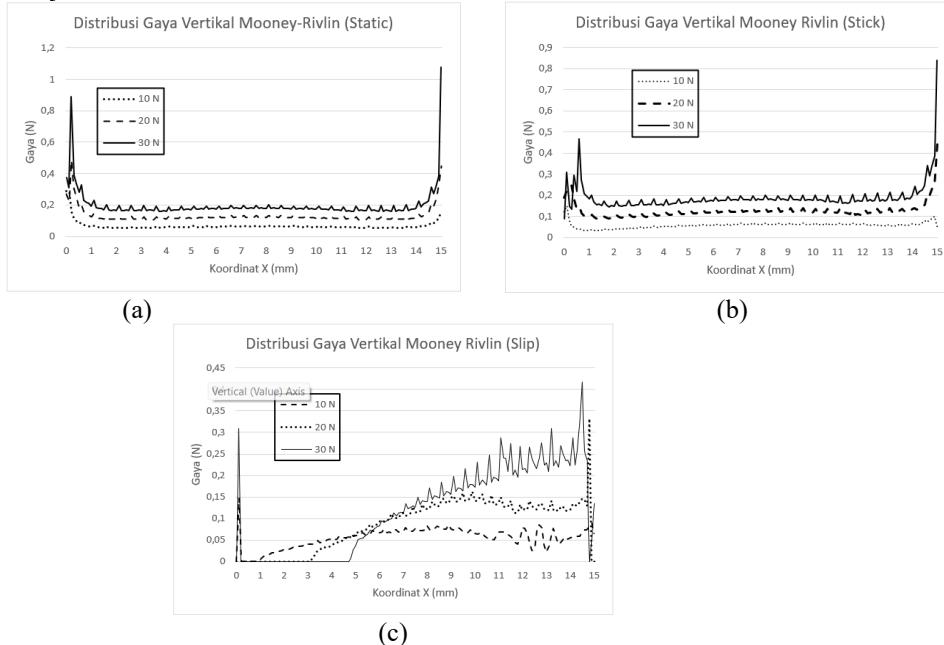
4.2 Distribusi Tegangan Maksimum



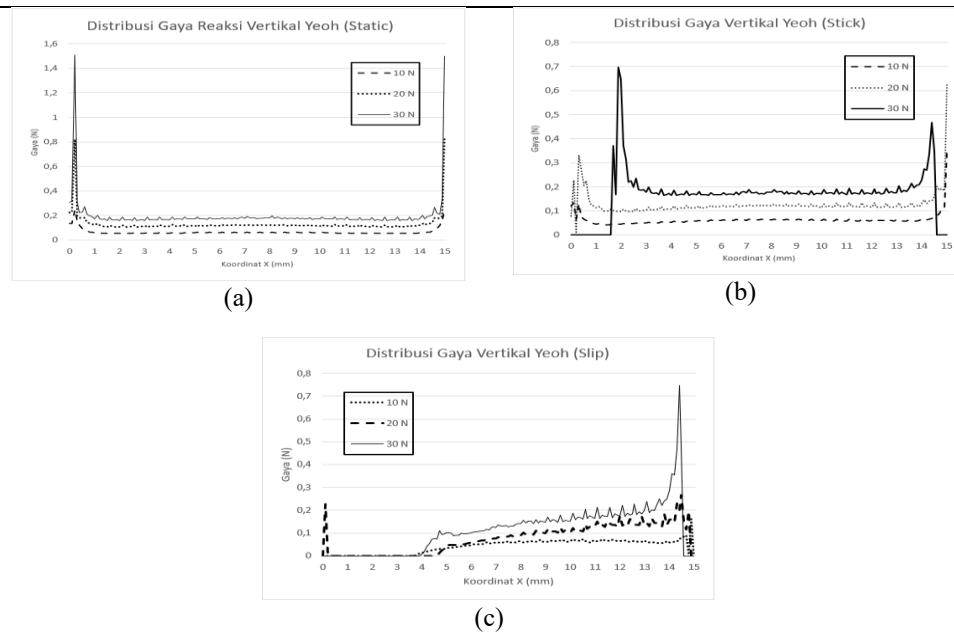
Gambar 6. Distribusi Tegangan dengan variasi SEF (a) Mooney-Rivlin dan (b) Yeoh

Distribusi tegangan pada tread block menunjukkan pola yang konsisten, yaitu nilai tegangan relatif rendah di awal kontak dan meningkat bertahap menuju ujung kontak. Pada model Mooney-Rivlin, kenaikan tegangan semakin tajam mendekati koordinat 13–14 mm sehingga konsentrasi utama terjadi di tepi kontak, sedangkan model Yeoh menampilkan distribusi yang lebih merata dengan kenaikan bertahap dan beberapa fluktuasi kecil di tengah bidang kontak.

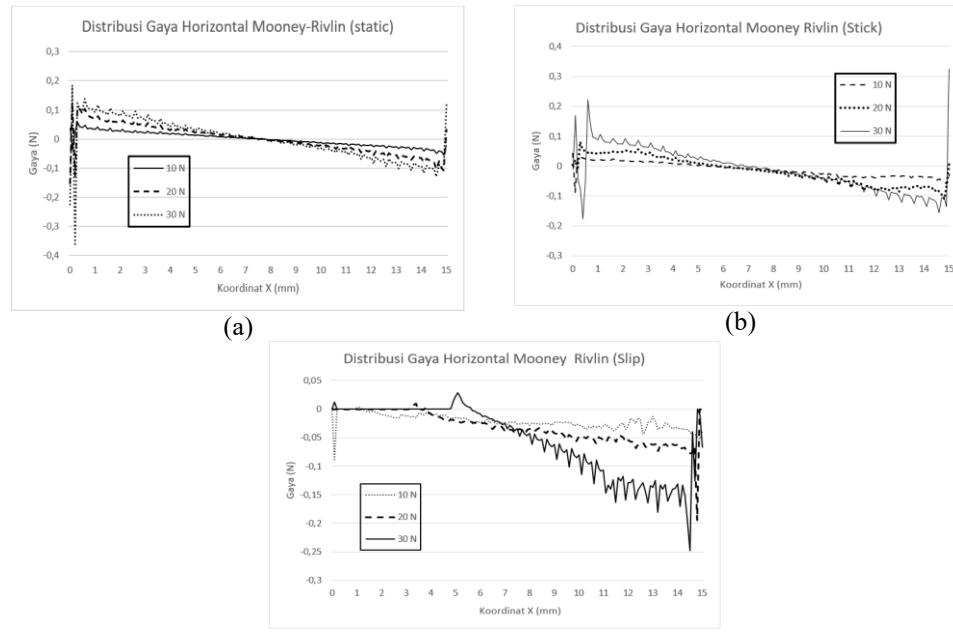
4.3 Distribusi Gaya Reaksi



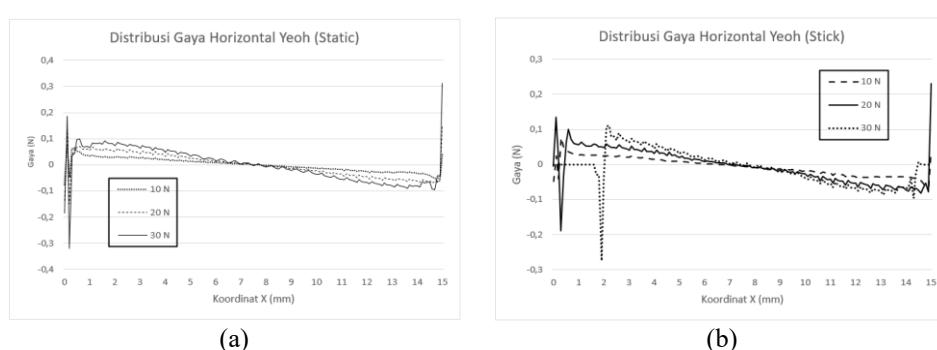
Gambar 5. Distribusi gaya reaksi vertical SEF Mooney Rivlin dengan kondisi
(a) static (b) stick (c) Slip

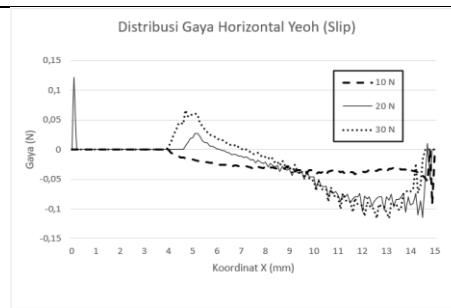


Gambar 6. Distribusi gaya reaksi horizontal *SEF Yeoh* dengan kondisi
(a) static (b) stick (c) Slip



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





(c)

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

distribusi gaya reaksi vertikal dan horizontal pada model Mooney-Rivlin dan Yeoh memperlihatkan karakteristik respons material yang berbeda secara mendasar, khususnya pada kondisi geser (slip). Pada gaya vertikal, kedua model menunjukkan pola yang relatif simetris dengan konsentrasi tegangan di ujung area kontak, tetapi pada kondisi geser (slip), model Yeoh menampilkan fluktuasi gaya yang lebih signifikan dan kompleks dibandingkan dengan pola Mooney-Rivlin yang lebih linier. Sebaliknya, distribusi gaya horizontal menunjukkan asimetri yang lebih jelas; model Mooney-Rivlin memperlihatkan penurunan gaya geser yang cenderung progresif di sepanjang permukaan,

sedangkan model Yeoh menampilkan variasi gaya yang lebih tajam dan fluktuatif, menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap deformasi geser lokal. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa model Yeoh lebih efektif dalam menangkap respons material yang non-linear dan kompleks pada kondisi geser, sementara Mooney-Rivlin lebih merepresentasikan perilaku yang lebih stabil dan bertahap.

4.4 Koefisien Gesek Total

Tabel 3. Hasil koefisien gesek total dengan gaya tekan 10 N, $\mu_{\text{Adhesi}} = 0.6$

Kondisi	Koefisien Gesek Total	
	Mooney Rivlin	Yeoh
Static	0	0
Stick	1,471	1,072
Slip	1,422	0,859

Tabel 4. Hasil koefisien gesek total dengan gaya tekan 20 N, $\mu_{\text{Adhesi}} = 0.6$

Kondisi	Koefisien Gesek Total	
	Mooney Rivlin	Yeoh
Static	0	0
Stick	2.495	2.507
Slip	1.905	1.743

Tabel 5. Hasil koefisien gesek total dengan gaya tekan 30 N, $\mu_{\text{Adhesi}} = 0.6$

Kondisi	Koefisien Gesek Total	
	Mooney Rivlin	Yeoh
Static	0	0
Stick	3.455	3.133
Slip	2.403	2.34

perbandingan koefisien gesek total (μ_{total}) antara model Mooney-Rivlin dan Yeoh menunjukkan variasi yang signifikan seiring dengan peningkatan gaya tekan. Pada kondisi statis, kedua model secara konsisten menghasilkan koefisien gesek nol, yang sesuai dengan teori bahwa tidak ada gerakan atau gesekan yang terjadi sebelum gaya geser

mencapai ambang batasnya. Namun, pada kondisi stick dan slip, terjadi peningkatan koefisien gesek total yang proporsional dengan peningkatan gaya tekan. Model Mooney-Rivlin menunjukkan nilai koefisien gesek yang secara konsisten lebih tinggi dibandingkan model Yeoh, khususnya pada kondisi slip di mana perbedaannya paling terlihat. Hal ini mengindikasikan bahwa model Mooney-Rivlin, dengan parameter materialnya yang berbeda, lebih sensitif terhadap efek gesekan dan cenderung memprediksi resistansi gesek yang lebih besar dibandingkan model Yeoh. Perbedaan ini krusial dalam memilih model konstitutif yang paling akurat untuk simulasi yang melibatkan kontak dan gesekan pada material non-linear.

5. Kesimpulan

Dari hasil simulasi tersebut diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Variasi gaya tekan 10 N, 20 N, dan 30 N berpengaruh signifikan terhadap kondisi tread block, di mana semakin besar beban normal maka semakin besar pula defleksi, gaya reaksi, serta perubahan dari kondisi static, stick, hingga slip.
2. Distribusi tegangan menunjukkan peningkatan seiring penambahan beban. Tegangan horizontal dominan di bagian tengah bidang kontak, sedangkan tegangan vertikal terbesar berada di area bawah tread block. Koefisien gesek total berkisar antara 0,29–0,62, dengan kecenderungan menurun saat slip.
3. Perbandingan model menunjukkan bahwa Yeoh menghasilkan nilai koefisien gesek lebih tinggi dan lebih sensitif terhadap variasi beban, sementara Mooney-Rivlin memberikan distribusi tegangan yang lebih merata.

6. Daftar Pustaka

- [1] Danesworo, D., Setiyana, B., & Tauviqirrahman, M. (2021). Investigasi Dampak Beban Pada Kontak Gesek *Tread Block SBR 25* Pada Permukaan *Rigid* Dengan Metode *Finite Element*. *Jurnal Teknik Mesin* **9(3)**, 417-428.
- [2] Dassault. (2012). *ABAQUS User's Manual: ABAQUS/CAE User's Manual*.
- [3] Providence, RI, USA: Dassault System Simulia Corp.
- [4] Fuadi, Z. (2016). Analisis Pengaruh Perbedaan Koefisien Gesekan Statis dan Kinetis Terhadap Gerakan *Stick-Slip* Menggunakan Bahan Viskoelastis. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, **11(1)**, hal. 51-55.
- [5] Garcia, M. J. R., Ruiz, O. E. S., Lopez, C., Gonzalez, L. Y. S., Botero, M. G. dan Betancur, M. (2005). *Hyperelastic Material Modeling, Technical Report*, hal. 85.
- [6] Gent, A. N. (1989). *A Hypothetical Mechanism for Rubber Abrasion. Rubber chemistry and technology* **62(4)**, hal. 750-756.
- [7] Gent, A. N. (1992). *Engineering with Rubber, How to Design Rubber Components- 2nd Edition*. Munich: Hanser Publisher.
- [8] Kato, K., & Adachi, K. (2001). *Modern Tribology Handbook* (Vol 1).
- [9] Liang, H. (2007). *Investigating the Mechanism of Elastomer Abrasion*. PhD thesis, University of London, London.
- [10] Madenci, E., & Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering using ANSYS 2nd Edition*. Springer.
- [11] McKeen, L. W. (2012). *Film Properties of Plastics and Elastomers. 3rd Edition*.
- [12] Kidlington, Oxford: Elsevier.