

STUDI PERBANDINGAN INDENTASI BOLA KAKU TERHADAP MATERIAL KARET SBR-25 DENGAN PENURUNAN KOEFISIEN UNTUK MODEL MOONEY-RIVLIN

*Syaiful Anwar¹, Budi Setiyana², Ismoyo Haryanto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Soedarto. SH. Tembelang-Semarang 50275. Telp. +62247460059

*Email: syaifulanwar1822@gmail.com

ABSTRAK

Mekanika kontak merupakan salah satu cabang penting dari disiplin ilmu *tribology*. Salah satu permasalahan dari mekanika kontak adalah kontak elastis antara *spherical* dengan material elastomer. Analisa terhadap mekanika kontak telah dikembangkan oleh banyak peneliti. Teori kontak elastis orde I telah dikembangkan oleh Hertz pada tahun 1880. Sabin dan Kaloni menemukan solusi orde dua untuk material karet yang tidak dapat dikompresi pada tahun 1989. Selanjutnya, Giannakopoulos dan Triantafyllou mengemukakan analisis teoritis terhadap material *hyperelastic* pada tahun 2007. Beberapa teori konstitutif telah dikembangkan untuk mendefinisikan kekakuan material *hyperelastic* yang disebut dengan *strain energy function* (SEF). Teori SEF yang telah dikenal diantaranya Neo-Hookean SEF, Mooney-Rivlin SEF, Ogden SEF, Yeoh SEF, dll. Pada penelitian ini menyajikan studi perbandingan kasus kontak tekan antara *ball indenter* terhadap material SBR yang memiliki kandungan 25% karbon (SBR-25) berbasis metode elemen hingga dengan bantuan *software Abaqus 6.14-5* terhadap analisis perhitungan orde I dan orde II. Pada pemodelan, terdapat variasi diameter indenter yaitu 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm dengan menggunakan definisi *strain energy function* (SEF) model Mooney-Rivlin dan Yeoh. Hasil dari penelitian ini berupa hubungan antara gaya vertikal terhadap kedalaman indentasi yang selanjutnya dibandingkan dengan analisa perhitungan analitis menurut teori Hertz, Sabin & Kaloni (S&K) dan Giannakopoulos & Triantafyllou (G&T). Berdasarkan dari hasil simulasi dan perhitungan analitis menunjukkan bahwa semakin besar diameter indenter yang mengindentasi elastomer semakin besar pula nilai gaya vertikal yang dihasilkan.

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

ABSTRACT

Contact mechanics is one of the important branches of tribology. One of the problems of contact mechanics is the elastic contact between spherical and elastomeric materials. Analysis of contact mechanics has been developed by many researchers. The first-order elastic contact theory was developed by Hertz in 1880. Sabin and Kaloni found a second-order solution for incompressible rubber materials in 1989. Furthermore, Giannakopoulos and Triantafyllou proposed a theoretical analysis of hyperelastic materials in 2007. Several constitutive theories have been developed to define the stiffness of hyperelastic materials called the strain energy function (SEF). The known SEF theories include Neo-Hookean SEF, Mooney-Rivlin SEF, Ogden SEF, Yeoh SEF, etc. This study presents a comparative study of the case of compression contact between ball indenters and SBR material containing 25% carbon (SBR-25) based on the finite element method with the help of Abaqus 6.14-5 software with first-order and second-order solution. In the modeling, there are variations in the diameter of the indenter, namely 2 mm, 3 mm, 4 mm, and 5 mm by using the definition of the strain energy function (SEF) of the Mooney-Rivlin and Yeoh models. The result of this research is the relationship between vertical force and indentation depth which is then compared with analytical calculations according to the theory of Hertz, Sabin & Kaloni (S&K) and Giannakopoulos & Triantafyllou (G&T). Based on the simulation results and analytical calculations show that the larger the diameter of the indenter that indents the elastomer, the greater the value of the resulting vertical force.

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

1. PENDAHULUAN

Elastomer berasal dari dua istilah yaitu *elasto* dan *mer*. Kata *elasto* menggambarkan kemampuan material untuk kembali ke bentuk semula sedangkan kata *mer* berasal dari istilah polimer. Polimer sendiri adalah zat yang terdiri dari molekul dengan massa molekul besar dari unit struktural berulang atau *monomer* yang dihubungkan oleh ikatan kovalen kimia [1]. Elastomer dapat terbuat dari material termoplastik maupun termoset [2]. *Elastomer* mempunyai sifat *non-linear* yang dapat diisi dengan partikel *rigid* seperti karbon hitam untuk meningkatkan kekakuan *elastomer* [3].

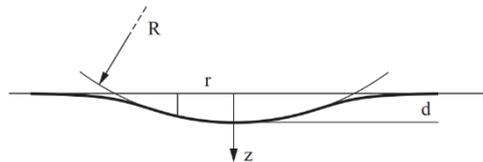
Elastomer mempunyai perilaku *stress-strain* yang *non-linear* dan sering digambarkan sebagai material *hyperelastic*. *Hyperelasticity* merupakan kemampuan suatu material untuk mengalami regangan elastis yang besar yang diakibatkan oleh gaya yang kecil tanpa kehilangan sifat aslinya [4]. Beberapa teori konstitutif telah dikembangkan untuk mendefinisikan kekakuan material *hyperelastic* yang disebut dengan *strain energy function* (SEF). Teori SEF yang telah dikenal diantaranya Neo-Hookean SEF, Mooney-Rivlin SEF, Ogden SEF, Yeoh SEF, dll. Mooney SEF biasa digunakan untuk menjelaskan karakter *unfilled elastomers* seperti SBR-0, NR-0, dan BR-0. Hal ini dikarenakan koefisien-koefisiennya dapat bekerja dengan baik pada *unfilled elastomers*. Sedangkan Yeoh SEF digunakan untuk menjelaskan karakter *filled elastomer* seperti SBR-25 karena dapat mewakili perilaku *stress-strain* pada *filled elastomer* [5].

Pada penelitian ini membahas tentang studi perbandingan kasus kontak tekan antara *ball indenter* terhadap permukaan *elastomer* jenis SBR-25 yang menggunakan koefisien *hyperelastic* model Mooney-Rivlin. Analisa simulasi kontak menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software ABAQUS 6.14-5*. Kasus kontak pada material SBR-25 yang menggunakan koefisien model Mooney-Rivlin belum pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya, sehingga nilai koefisien yang dibutuhkan perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu. Selanjutnya hasil yang didapat akan dibandingkan dengan simulasi yang menggunakan koefisien model Yeoh dan perhitungan analitis orde I dan II.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Hertzian Contact Theory

Mekanika kontak merupakan salah satu cabang penting dari disiplin ilmu *tribology*. Salah satu permasalahan dari mekanika kontak adalah kontak elastis antara *spherical* dengan material elastomer. Teori kontak tekan antara *rigid indenter* terhadap material *elastomer* telah dikembangkan oleh Hertz pada tahun 1880 yang menjadi dasar dari sebagian besar permasalahan mekanika kontak [6]. Pada teori kontak elastis, Hertz memberikan hubungan antara beban kontak terhadap kedalaman indentasi. Hertz mengasumsikan bahwa benda kontak dianggap sebagai *elastic half-space* dan tidak ada gesekan pada permukaan kontak (*frictionless*) [7]. Pemodelan indentasi antara *rigid indenter* dengan *elastomer* menurut Hertz dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Skema Pemodelan Kontak Tekan [6]

Tekanan kontak maksimum pada permukaan kontak ditunjukkan pada Persamaan 1 di bawah ini.

$$p_0 = \frac{2}{\pi} E^* \left[\frac{\delta}{R} \right]^{1/2} \quad (1)$$

dimana p_0 adalah tekanan kontak, E^* adalah modulus elastisitas efektif, δ adalah kedalaman indentasi dan R adalah radius indenter [6].

2.2 Second Order Elasticity

Dalam konteks hiperelastisitas, deformasi mekanis *elastomer* ditangkap oleh berbagai model yang akurat hingga tingkat tegangan tertentu, dengan model sederhana yang sesuai dengan tingkat tegangan yang rendah. Sabin dan Kaloni menemukan solusi orde kedua yang untuk material karet yang tidak dapat dikompresi pada tahun 1989. Teori orde II Sabin dan Kaloni (S&K) dapat dilihat pada Persamaan 2 di bawah ini.

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R} \left[1 - \frac{4\alpha}{3\pi R} (1 - \ln 2) \right] ; P = \frac{16}{3} \mu \frac{\alpha^3}{R} \left[1 + \frac{9\alpha}{4\pi R} \right] \quad (2)$$

dimana δ merupakan kedalaman indentasi, P adalah gaya (beban) vertikal yang bekerja, α adalah radius kontak, R merupakan radius *ball indenter*, dan μ merupakan *shear modulus*.

Namun, teori analitis orde II yang ditemukan oleh Sabin dan Kaloni pada kasus *spherical indentation* belum terdapat verifikasi eksperimen dan perhitungan analitis, sehingga Giannakopoulos dan Triantafyllou pada tahun 2007 melakukan analisis teoritis pada material hiperelastis menggunakan *Finite Element Method* untuk mengatasi beberapa masalah tersebut. Perhitungan analitis orde II menurut G&T dapat dilihat pada Persamaan 3 dan 4 di bawah ini.

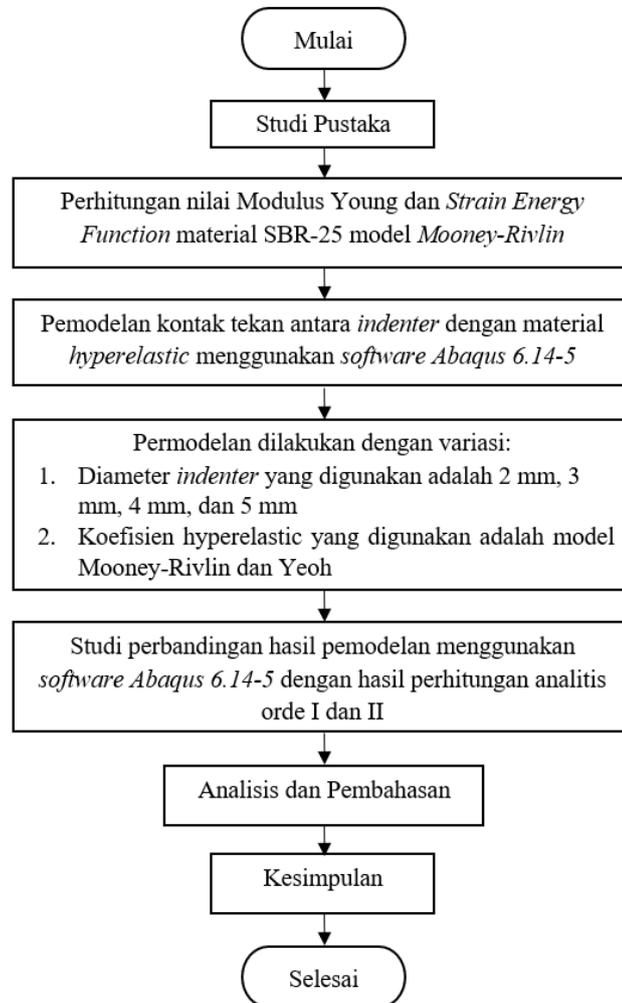
$$\delta = \alpha \varepsilon (1 - 0.1555\varepsilon) = \frac{\alpha^2}{R} \left(1 - 0.1555 \frac{\alpha}{R} \right) \quad (3)$$

$$P = \frac{16}{3} \alpha^2 \varepsilon \mu \left(1 + \frac{9\varepsilon}{4\pi} \right) \quad (4)$$

dimana δ adalah kedalaman indentasi, α adalah radius kontak, μ adalah modulus geser saat tegangan = 0, ϵ adalah nilai regangan, R adalah radius *ball indenter*, dan P adalah beban vertikal yang diterapkan [8].

2.3 Diagram Alir Penelitian

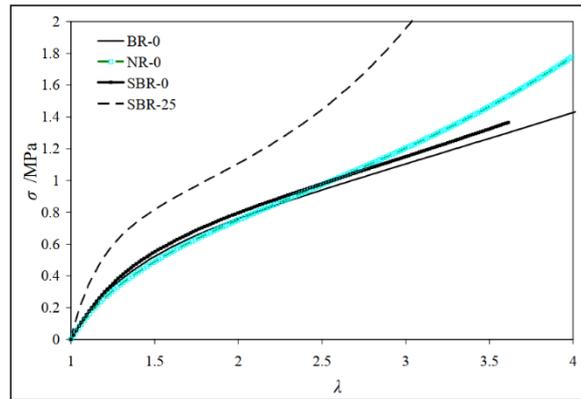
Pada penelitian ini terdapat beberapa proses desain dan analisis mekanika kontak tekan antara *indenter* dengan *elastomer*. Langkah- langkah penelitian yang akan dilakukan ditunjukkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.4 Menentukan Modulus Elastisitas Material SBR-25

Regangan dan tegangan memiliki hubungan proposional yang mencirikan sifat elastisitas bahan pada tingkat pembebanan tertentu. Sifat elastisitas bahan ini ditunjukkan dengan modulus elastisitas [9]. Perhitungan modulus elastisitas material SBR-25 diawali dengan melakukan analisa terhadap grafik *engineering stress-tensile extension ratio* material SBR-25 pada disertasi milik Hancheng Liang yang kemudian diplot ulang menjadi nilai *true stress-strain* untuk dilakukan perhitungan regresi *linear*. Berikut merupakan grafik hubungan *engineering stress-tensile extension ratio* yang ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.

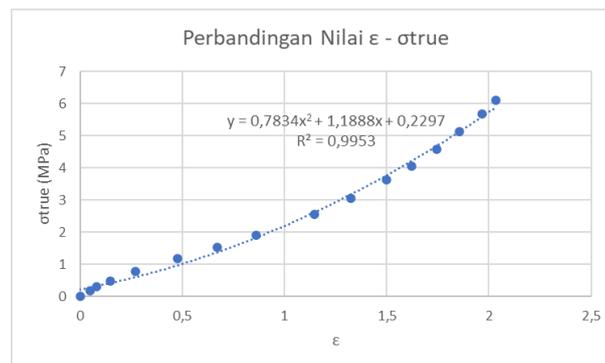


Gambar 3. Grafik *Engineering Stress-Tensile Extension Ratio* [5]

Dari grafik di atas diperoleh data nilai λ dan σ_e . Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai *true engineering*. Berikut ini merupakan persamaan hubungan antara *engineering stress - tensile extension ratio* dengan *true-stress* yang dapat dilihat pada Persamaan 5 berikut.

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{true}}{\lambda} \quad (5)$$

dimana σ_e adalah *engineering stress*, σ_{true} merupakan *true engineering*, dan λ adalah *lambda*. Setelah dilakukan perhitungan dari nilai λ dan σ_e lalu didapatkan nilai ϵ dan σ_{true} untuk material SBR-25. Selanjutnya, nilai ϵ dan σ_{true} diplot ke dalam bentuk kurva tegangan - regangan lalu dilakukan regresi polinomial untuk memperoleh gradien garis yang akan menjadi nilai *modulus Young*. Kurva tegangan-regangan dari material SBR-25 dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Hubungan σ_{true} - ϵ Material SBR-25

Dari perhitungan regresi yang dilakukan diperoleh nilai modulus elastisitas untuk material SBR-25 sebesar 2,73 MPa dengan t_{hitung} sebesar 1,53. Selanjutnya dilakukan validasi menggunakan *uji-T Test* satu sampel (*one sample t-test*). Uji T (*Test T*) adalah salah satu uji statistik yang digunakan untuk menguji kebenaran atau kepalsuan hipotesis yang menyatakan bahwa diantara dua buah *mean* sampel yang diambil secara random dari populasi yang sama, tidak terdapat perbedaan yang signifikan [10]. Berdasarkan tabel T Cleophas & Zwinderman dengan signifikansi 5% didapatkan nilai t_{tabel} sebesar 2,145. Karena $t_{hitung} = 1,43 < t_{tabel} = 2,145$, maka hipotesis diterima artinya pernyataan bahwa rata-rata modulus elastisitas sebesar 2,73 MPa dapat diterima dan tidak dapat diterima jika sudah mencapai pengukuran ke 16 yaitu saat modulus elastisitas bernilai 4,377 MPa karena sudah melebihi batas atas signifikansi 5% yaitu 4,272 MPa.

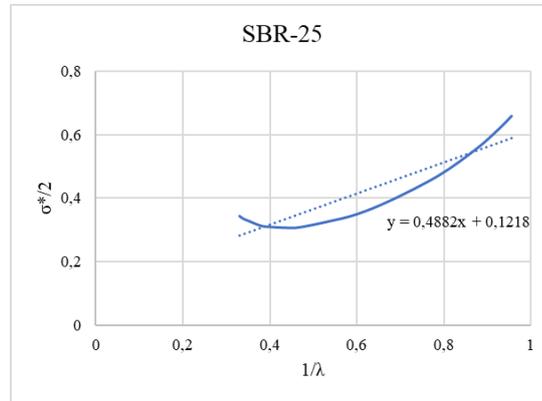
2.5 Menentukan Nilai Koefisien Mooney-Rivlin SEF untuk Material SBR-25

Perhitungan SEF model Mooney-Rivlin diawali dengan melakukan analisa terhadap grafik *engineering stress-tensile extension ratio* material SBR-25 pada disertasi milik Hancheng Liang seperti yang terlihat pada Gambar 3 di atas. Dari grafik tersebut didapat data λ dan σ_e . Selanjutnya nilai λ dan σ_e tersebut dimasukkan ke persamaan *half reduced stress* seperti yang dapat dilihat pada Persamaan 6 di bawah ini.

$$\frac{\sigma^*}{2} = \frac{\sigma}{2(\lambda - \lambda^{-2})} = C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \quad (6)$$

dimana $\frac{\sigma^*}{2}$ merupakan *half reduced stress*, σ adalah *engineering stress*, C_1 dan C_2 merupakan koefisien *hyperelastic*, dan λ adalah *lambda* [5].

Setelah mendapatkan nilai *half reduced stress*, kemudian nilai tersebut dibandingkan dengan $1/\lambda$ dan diplot ke dalam grafik sehingga membentuk kurva. Dari kurva tersebut akan didapat koefisien C_1 dan C_2 . Nilai C_1 merupakan nilai perpotongan garis lurus pada sumbu y, sedangkan nilai C_2 merupakan gradien kurva tersebut. Nilai-nilai koefisien tersebut digunakan sebagai *input properties* material saat permodelan kontak tekan menggunakan *software Abaqus 6.14-5* [5]. Grafik hubungan *half reduced stress* dan $1/\lambda$ dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Hubungan *half reduced stress* (σ^*) dan $1/\lambda$ Material SBR-25

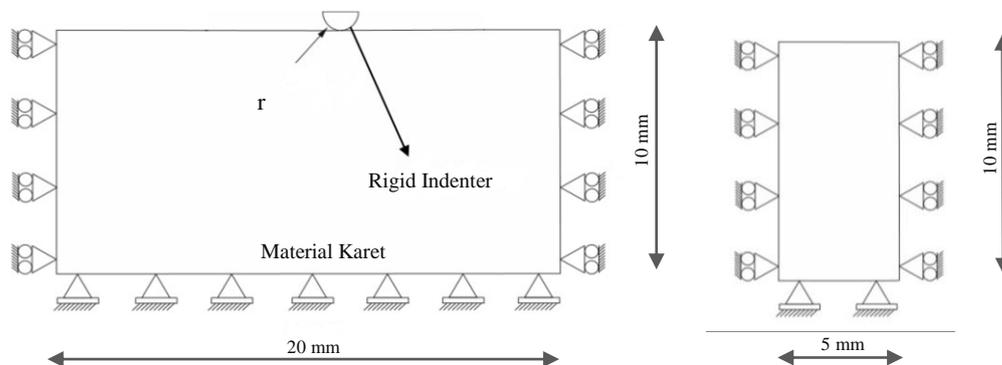
Dari hasil perhitungan selanjutnya diperoleh nilai koefisien *hyperelastic* model Mooney-Rivlin untuk material SBR-25 yang dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Koefisien *Mooney-Rivlin* Material SBR-25

Material	C_1/Mpa	C_2/Mpa	$D_{\text{com}}/(\text{Mpa})^{-1}$	$\rho/10^3 \text{ kgm}^{-3}$
SBR-25	0,1218	0,4881	0,062	1,12

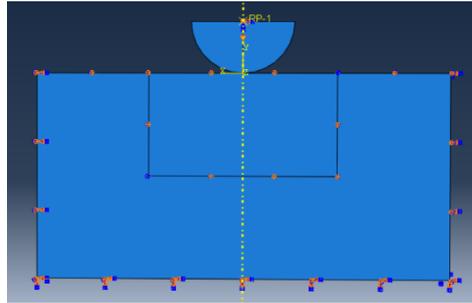
2.6 Pemodelan Metode Elemen Hingga

Pada penelitian ini simulasi dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software Abaqus 6.14-5*. Simulasi kontak tekan yang dilakukan menggunakan koefisien *hyperelastic* model Mooney-Rivlin dan Yeoh dengan kedalaman indentasi sebesar 0,8 mm. Nilai koefisien gesek yang digunakan adalah 0. Variasi diameter *indenter* yang digunakan adalah 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm. Gambaran dari kasus penelitian ini dimodelkan dalam bentuk 3 dimensi dengan ukuran 20 mm x 10 mm dan ketebalan 5 mm seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6 di bawah.



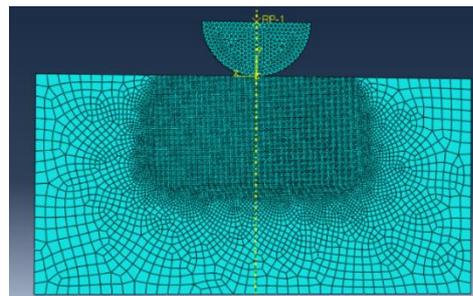
Gambar 6. Skema Pemodelan Kontak Tekan Material *Hyperelastic*.
 (a) Kondisi Awal Tampak Depan (b) Kondisi Awal Tampak Samping

Pemodelan kontak tekan pada sisi bagian kanan-kiri dan depan-belakang dari elastomer ditumpu terhadap arah horizontal sehingga elastomer dapat bergerak bebas pada arah vertikal, sedangkan untuk bagian bawah elastomer ditumpu mati sehingga tidak dapat bergerak bebas pada arah manapun seperti yang pada Gambar 7 di bawah.



Gambar 7. Pemodelan Kondisi Batas pada Kontak Tekan Material *Hyperelastic*

Proses pemodelan selanjutnya adalah *meshing*. *Meshing* adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit [7], seperti yang diperlihatkan pada Gambar 8.



Gambar 8. *Meshing* pada Pemodelan Kontak Tekan Material *Hyperelastic*

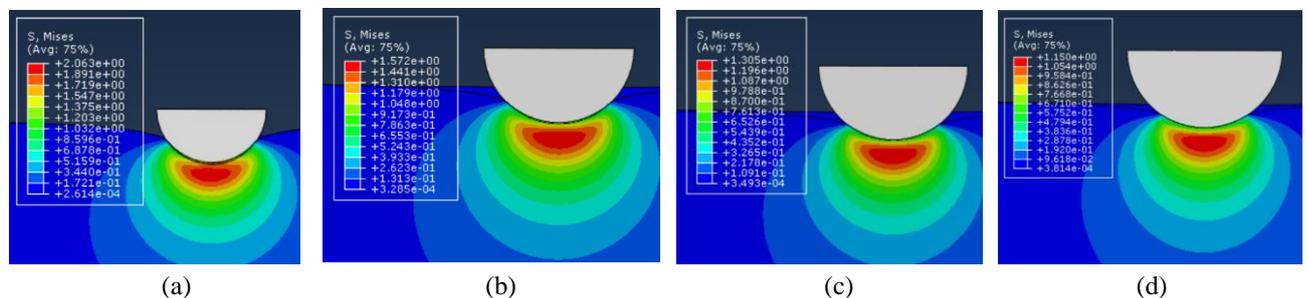
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan kontak tekan indenter terhadap material *hyperelastic* menggunakan *software Abaqus 6.14-5* menghasilkan beberapa luaran. Berikut ini merupakan beberapa *output* dari simulasi yang telah dilakukan.

3.2.1 Distribusi Tegangan Von Mises

3.1.1 Distribusi Tegangan Von Mises Model Mooney-Rivlin

Berikut ini merupakan plot kontur permukaan *elastomer* beserta *legend* pada kondisi akhir indentasi tekan pada model Mooney-Rivlin yang dapat dilihat pada Gambar 9 di bawah.

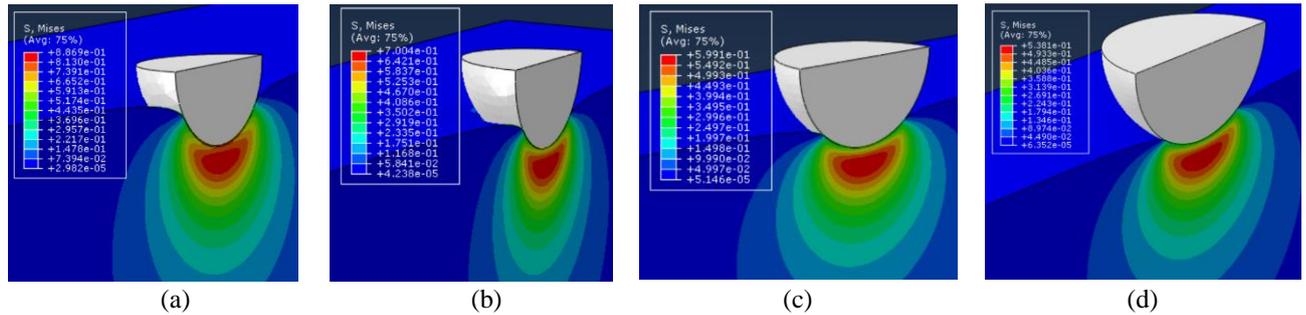


Gambar 9. Distribusi Tegangan Von Mises Material SBR-25 pada Model Mooney-Rivlin (a) Diameter Indenter 2 mm (b) Diameter Indenter 3 mm (c) Diameter Indenter 4 mm (d) Diameter Indenter 5 mm

Pada Gambar 9 di atas, material SBR-25 dengan model Mooney-Rivlin yang memiliki diameter indenter sebesar 2 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 2,063 MPa sedangkan untuk diameter indenter 3 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 1,572 MPa. Untuk material SBR-25 dengan model Mooney-Rivlin yang memiliki diameter indenter sebesar 4 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 1,305 MPa sedangkan untuk diameter indenter 5 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 1,15 MPa. Dari Gambar 9 di atas terlihat bahwa indenter yang mempunyai diameter sebesar 2 mm menghasilkan tegangan Von Mises paling besar yaitu sebesar 2,063 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil diameter indenter yang menekan semakin besar pula tegangan Von Mises yang terjadi.

3.1.2 Distribusi Tegangan Von Mises Model Yeoh

Berikut ini merupakan plot kontur permukaan *elastomer* beserta *legend* pada kondisi akhir indentasi tekan pada model Yeoh yang dapat dilihat pada Gambar 10 di bawah.



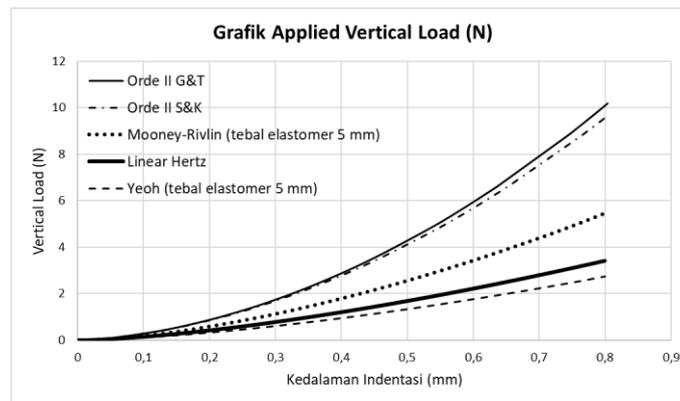
Gambar 10. Distribusi Tegangan Von Mises Material SBR-25 pada Model Yeoh (a) Diameter Indenter 2 mm (b) Diameter Indenter 3 mm (c) Diameter Indenter 4 mm (d) Diameter Indenter 5 mm

Pada Gambar 10 di atas, material SBR-25 dengan model Yeoh yang memiliki diameter indenter sebesar 2 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 0,8869 MPa sedangkan untuk diameter indenter 3 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 0,7004 MPa. Untuk material SBR-25 dengan model Yeoh yang memiliki diameter indenter sebesar 4 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 0,5991 MPa sedangkan untuk diameter indenter 5 mm pada kondisi akhir menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 0,5381 MPa. Dari hasil simulasi kedua model di atas, model Mooney-Rivlin secara umum menghasilkan nilai tegangan Von Mises yang lebih tinggi di setiap diameter indenter dibandingkan dengan model Yeoh.

3.2.2 Perbandingan Gaya Vertikal (P) terhadap Kedalaman Indentasi (δ)

3.2.1 Perbandingan Gaya Vertikal (P) terhadap Kedalaman Indentasi (δ) pada Diameter Indenter 2 mm

Berikut ini merupakan hasil perbandingan gaya vertikal (P) terhadap kedalaman indentasi (δ) pada diameter indenter 2 mm yang dapat dilihat pada Gambar 11 di bawah ini.

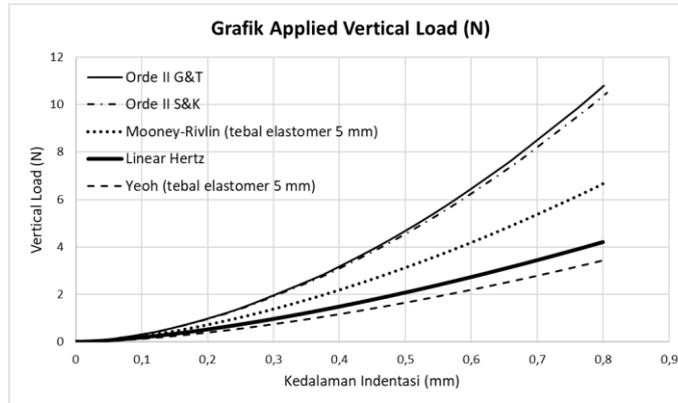


Gambar 11. Grafik Perbandingan *Vertikal Load* (P) - Kedalaman Indentasi (δ) pada $\delta = 2$ mm

Pada kondisi akhir penekanan, metode perhitungan *second order elasticity* model G&T membutuhkan gaya vertikal sebesar 10,17 N. Selanjutnya, perhitungan *second order elasticity* model S&K membutuhkan gaya vertikal sebesar 9,71 N, dan untuk perhitungan orde I linear Hertz membutuhkan gaya vertikal sebesar 3,427 N. Sedangkan metode penyelesaian menggunakan simulasi *software Abaqus 6.14-5* untuk model Mooney-Rivlin membutuhkan gaya vertikal sebesar 5,44 N dan untuk model Yeoh membutuhkan gaya vertikal sebesar 2,74 N.

3.2.2 Perbandingan Gaya Vertikal (P) terhadap Kedalaman Indentasi (δ) pada Diameter Indenter 3 mm

Berikut ini merupakan hasil perbandingan gaya vertikal (P) terhadap kedalaman indentasi (δ) pada diameter indenter 3 mm yang dapat dilihat pada Gambar 12 di bawah ini.

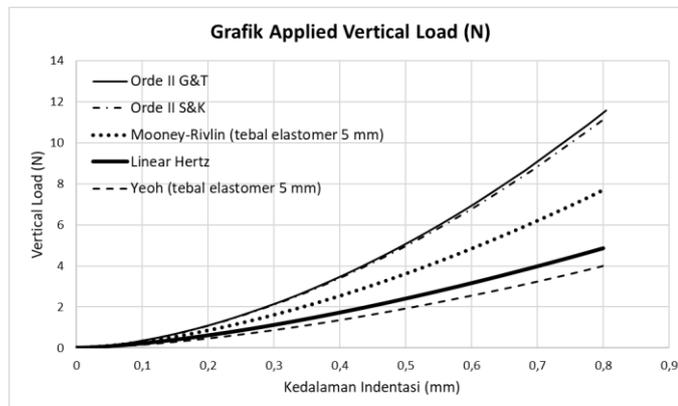


Gambar 12. Grafik Perbandingan *Vertikal Load (P)* - Kedalaman Indentasi (δ) pada $\delta = 3$ mm

Pada kondisi akhir penekanan, metode perhitungan *second order elasticity* model G&T membutuhkan gaya vertikal sebesar 10,807 N. Selanjutnya, perhitungan *second order elasticity* model S&K membutuhkan gaya vertikal sebesar 10,49 N, dan untuk perhitungan orde I linear Hertz membutuhkan gaya vertikal sebesar 4,19 N. Sedangkan metode penyelesaian menggunakan simulasi *software Abaqus 6.14-5* untuk model Mooney-Rivlin membutuhkan gaya vertikal sebesar 6,67 N dan untuk model Yeoh membutuhkan gaya vertikal sebesar 3,43 N.

3.2.3 Perbandingan Gaya Vertikal (P) terhadap Kedalaman Indentasi (δ) pada Diameter Indenter 4 mm

Berikut ini merupakan hasil perbandingan gaya vertikal (P) terhadap kedalaman indentasi (δ) pada diameter indenter 4 mm yang dapat dilihat pada Gambar 13 di bawah ini.

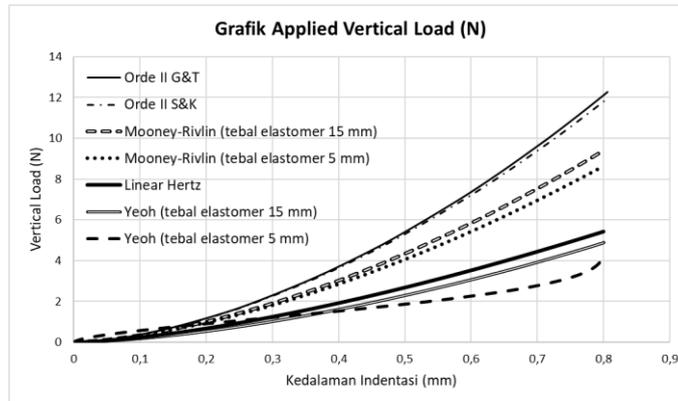


Gambar 13. Grafik Perbandingan *Vertikal Load (P)* - Kedalaman Indentasi (δ) pada $\delta = 4$ mm

Pada kondisi akhir penekanan, metode perhitungan *second order elasticity* model G&T membutuhkan gaya (beban) vertikal sebesar 11,58 N. Selanjutnya, perhitungan *second order elasticity* model S&K membutuhkan gaya (beban) vertikal sebesar 11,15 N, dan untuk perhitungan orde I linear Hertz membutuhkan gaya (beban) sebesar 4,84 N. Sedangkan metode penyelesaian menggunakan simulasi *software Abaqus 6.14-5* untuk model Mooney-Rivlin membutuhkan gaya (beban) vertikal sebesar 7,72 N dan untuk model Yeoh membutuhkan gaya (beban) vertikal sebesar 4,01 N.

3.2.4 Perbandingan Gaya Vertikal (P) terhadap Kedalaman Indentasi (δ) pada Diameter Indenter 5 mm

Berikut ini merupakan hasil perbandingan gaya vertikal (P) terhadap kedalaman indentasi (δ) pada diameter indenter 5 mm yang dapat dilihat pada Gambar 14 di bawah ini.



Gambar 14. Grafik Perbandingan *Vertical Load* (P) - Kedalaman Indentasi (δ) pada $\delta = 5$ mm

Pada kondisi akhir penekanan, metode perhitungan *second order elasticity* model G&T membutuhkan gaya (beban) vertikal sebesar 12,28 N. Selanjutnya, perhitungan *second order elasticity* model S&K membutuhkan gaya (beban) vertikal sebesar 12,014 N, dan untuk perhitungan orde I linear Hertz membutuhkan gaya (beban) sebesar 5,41 N. Sedangkan metode penyelesaian menggunakan simulasi *software Abaqus 6.14-5* untuk model Mooney-Rivlin membutuhkan gaya (beban) vertikal sebesar 8,65 N dan untuk model Yeoh membutuhkan nilai gaya (beban) vertikal sebesar 4,52 N.

Selanjutnya, penulis melakukan percobaan dengan mengubah dimensi ketebalan material *elastomer* dari 5 mm menjadi 15 mm saat pemodelan menggunakan *Abaqus 6.14-5*. Dari hasil eksperimen tersebut memberikan dampak kenaikan nilai gaya (beban) vertikal yang dibutuhkan. Pada model Mooney-Rivlin dengan menambah ketebalan material *elastomer* menjadi 15 mm nilai gaya (beban) vertikal yang dibutuhkan menjadi 9,406 N dari yang sebelumnya 8,65 N. Sedangkan pada model Yeoh nilai gaya (beban) vertikal yang dibutuhkan dari yang sebelumnya 4,52 N menjadi 4,89 N.

Dapat dilihat pada Gambar 14 di atas dari hasil pemodelan menggunakan *software Abaqus 6.14-5* menunjukkan bahwa gaya (beban) vertikal yang diperlukan untuk mengindentasi material *elastomer* lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan metode perhitungan analitis pada kedalaman indentasi yang sama. Dengan kedalaman indentasi 0,8 mm pada pemodelan menggunakan *software Abaqus 6.14-5* model Yeoh membutuhkan gaya vertikal yang lebih kecil dibandingkan dengan model Mooney-Rivlin. Sedangkan pada metode perhitungan analitis, secara berturut-turut dari perhitungan linear Hertz, perhitungan S&K, dan perhitungan G&T membutuhkan gaya vertikal yang semakin besar.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang telah dilakukan menghasilkan beberapa *output* diantaranya nilai modulus elastisitas SBR-25, nilai koefisien *hyperelastic* SBR-25 model Mooney-Rivlin, kontur distribusi tegangan Von Mises, dan hubungan antara gaya vertikal terhadap kedalaman indentasi. Dari serangkaian analisis yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya:

1. Nilai modulus elastisitas SBR-25 yang diperoleh sebesar 2,73 MPa dan telah memenuhi uji *T-test* satu sampel dengan melakukan pengujian nilai tengah pada signifikansi sebesar 5%.
2. Dari perhitungan melalui persamaan *half reduced stress* diperoleh nilai koefisien *hyperelastic* model Mooney-Rivlin untuk material SBR-25 sebesar 0,1218 MPa untuk koefisien C1 dan 0,4881 MPa untuk koefisien C2.
3. Dari hasil pemodelan kontak tekan menggunakan *software Abaqus 6.14-5*, diameter indenter yang lebih kecil menghasilkan permukaan *elastomer* yang terdeformasi lebih dalam dibandingkan dengan diameter indenter yang lebih besar, sehingga kontur gelombang yang dihasilkan lebih besar.
4. Hasil pemodelan kontak tekan menggunakan *software Abaqus 6.14-5* menunjukkan bahwa gaya vertikal yang dibutuhkan untuk mengindentasi material *elastomer* lebih kecil dibandingkan dengan metode perhitungan analitis pada kedalaman indentasi yang sama. Dengan kedalaman indentasi 0,8 mm pada pemodelan menggunakan *software Abaqus 6.14-5* model Yeoh membutuhkan gaya vertikal yang lebih kecil dibandingkan dengan model Mooney-Rivlin. Sedangkan pada metode perhitungan analitis, secara berturut-turut dari perhitungan linear Hertz, perhitungan S&K, dan perhitungan G&T membutuhkan gaya vertikal yang semakin besar.

5. REFERENSI

- [1] Moore, D.F., 1972, "*The Friction and Lubrication of Elastomers*," Pergamon, Oxford.
- [2] McKeen, L. W., 2012, "*Film Properties of Plastics and Elastomers. 3rd ed.*," Kidlington, Oxford.
- [3] Shorter, R., 2014, "*The Mechanical Behaviour of Elastomers When Hollow Microspheres Are Used As A Particulate Filler*," London.
- [4] Garcia, M. J., Ruiz, O. E. S., & Lopez, C., 2005, *Technical Report Hyperelastic Material Modeling*.

-
- [5] Liang, H., 2007, "*Investigating the Mechanism of Elastomer Abrasion*," London.
 - [6] Popov, V. L., 2009, "*Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications*," Berlin.
 - [7] Yusra, A., Haryanto, I., Jamari., 2008, "*Analisa Kontak Elastis Antar Hemispheres Menggunakan Metode Elemen Hingga*," 10:1-2.
 - [8] Giannakopoulos, A.E., Triantafyllou, A., 2007, "*Spherical Indentation of Incompressible Rubber-like Materials*," 55:1197-1203
 - [9] Souisa, M., 2011, "*Analisis Modulus Elastisitas dan Angka Poisson Bahan dengan Uji Tarik*," 5:9-10.
 - [10] Ghozali, I., 2016, "*Aplikasi Analisis Multivariate Dengan Program IBM SPSS 23. Edisi 8*," Semarang.