

Fenomena Kontak Gesek Permukaan Karet SBR-25 yang Terabrasi dengan *Rigid Blade Indenter*: Investigasi Numerik

Budi Setiyana

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. H. Sudarto, SH Tembalang – Semarang Kotak Pos 1269

*E-mail: budisetiyana@lecturer.undip.ac.id

Abstract

In rubberlike materials, when a smooth surface is abraded, a periodic parallel ridged pattern is formed i.e. a series of parallel ridges which are perpendicular to the sliding direction is created on the rubber surface. The abrasion pattern forms initially with a certain spacing and ridge height and by increasing the number of abrasion cycles, the pattern size grows to a steady state pattern with a constant spacing length and a ridge height. The final pattern size of a steady state condition strongly depends on the value of the applied load on the abrader. Associated with the braking capacity of vehicle tire, a numerical investigation is proposed in this study to describe the frictional contact between a blade rigid indenter and the abraded surface of filled SBR with 25% carbon black (SBR-25). This study was developed by Finite Element Analysis (FEA) by using ABAQUS 6.14-5 software. This frictional contact is observed to obtain a coefficient of friction which generally consists of two components namely the adhesion component (due to surface roughness) and hysteresis components (due to deformation along friction). The contact simulation between rigid indenter and surface of hyper-elastic material are made with variation of indenter angle and coefficient of adhesion friction. It also varies with three chip thicknesses in elastomers that is 0,3 mm, 0,4 mm and 0,6 mm. The results obtained in the form of reaction horizontal force, hysteresis friction coefficient and total coefficient of friction with respect to sliding displacement of indenter. Based on the simulation results, the high surface roughness and large dimension of the chip cause the high total coefficient of friction however, fluctuative values are emerged.

Keywords: adhesion; hyper-elastic; coefficient of friction; SBR-25

Abstrak

Dalam material karet, ketika permukaan halus diabrasi, pola permukaan yang bergerigi secara paralel terbentuk yang arahnya tegak lurus dengan arah gerak dari *abrader*. Awalnya ukuran gerigi terbentuk dengan jarak dan dimensi tertentu dan dengan meningkatkan jumlah siklus abrasi, ukuran gerigi dan jarak antar gerigi akhirnya mempunyai dimensi dan jarak yang konstan. Ukuran pada pola gerigi yang konstan tersebut sudah memasuki kondisi tunak dan sangat tergantung pada nilai beban yang diterapkan pada abrader. Berkaitan dengan kapasitas pengereman pada ban kendaraan, investigasi numerik yang diberikan dalam penelitian ini untuk menggambarkan kontak gesek antara *blade indenter* dan permukaan bergerigi dari SBR dengan 25% karbon hitam (SBR-25). Penelitian ini dilakukan dengan *Finite Element Analysis (FEA)* menggunakan perangkat lunak ABAQUS 6.14-5. Kontak gesek ini diamati untuk mendapatkan koefisien gesek yang umumnya terdiri dari dua komponen yaitu komponen adhesi (karena kekasaran permukaan) dan komponen histeresis (karena deformasi sepanjang gesekan). Simulasi kontak antara *indenter* dan permukaan karet dibuat dengan variasi sudut indenter dan koefisien gesek adhesi. Ini juga dilakukan dengan variasi tiga ketebalan *chip* pada permukaan karet yaitu 0,3 mm, 0,4 mm dan 0,6 mm. Hasil yang diperoleh dalam bentuk gaya reaksi horisontal, koefisien gesek histeresis dan koefisien gesek total terhadap perpindahan geser indenter. Berdasarkan hasil simulasi, kekasaran permukaan yang tinggi dan dimensi chip yang tebal menyebabkan koefisien gesek total yang tinggi namun dengan nilai yang fluktuatif.

Kata kunci: adhesi; *hyperelastic*; koefisien gesek; SBR-25

1. Pendahuluan

Sifat material dalam merespon adanya beban luar dapat berupa sifat *elastic*, *elastic-plastic*, *plastic*, *hyperelastic*, *viscoelastic*, maupun *viscoplastic*. Dalam analisis kontak gesek secara umum, material karet bersifat lebih lunak dari material penggoresnya (*indenter*). Secara umum koefisien gesek pada kontak gesek pada material *hyperelastic* terdiri dari dua komponen, yaitu komponen adhesi yang disebabkan oleh kekasaran permukaan dan komponen *hysteresis* yang disebabkan oleh deformasi permukaan material. Kekasaran permukaan ini sudah biasa dikaitkan dengan koefisien gesek pada material logam atau material kaku lainnya. Tetapi pada material karet, sifat yang mudah berubah bentuk atau terdeformasi akan memberikan kontribusi pada koefisien gesek total. Fenomena ini memunculkan koefisien gesek akibat

deformasi atau *hysteresis*. Nilai koefisien gesek ini sangat berkaitan dengan kapasitas pengereman ban kendaraan dan umumnya yang terjadi adalah fenomena *stick-slip* baik dalam kontak gesek maupun kontak abrasi [1-3].

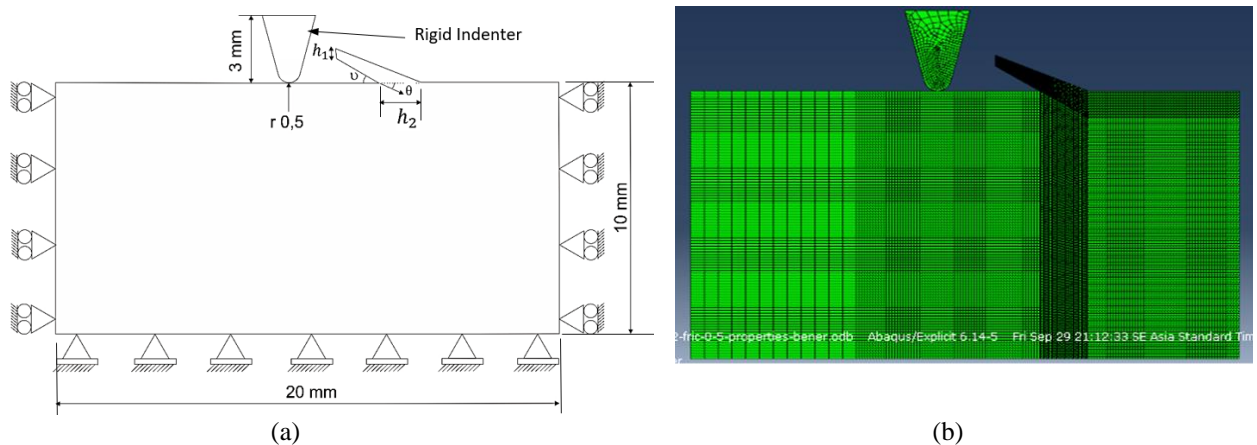
Dalam material karet, ketika permukaan halus diabrasi, pola permukaan yang bergerigi secara paralel terbentuk yang arahnya tegak lurus dengan arah gerak dari *abrader*. Awalnya ukuran gerigi terbentuk dengan jarak dan dimensi tertentu dan dengan meningkatkan jumlah siklus abrasi, ukuran gerigi dan jarak antar gerigi akhirnya mempunyai dimensi dan jarak yang konstan. Ukuran pada pola gerigi yang konstan tersebut sudah memasuki kondisi tunak dan sangat tergantung pada nilai beban yang diterapkan pada *abrader* [3-8]. Penelitian ini dilakukan terhadap kasus kontak antara material karet atau *elastomer* jenis *Styrene-butadiene Rubber* (SBR-25) dengan *rigid blade indenter*, dimana permukaan *elastomer* mempunyai bentuk yang sudah terabrasi. Nilai konstanta material *hyperelastic* ditentukan berdasarkan hasil uji tarik oleh Liang, dengan menggunakan model *Yeoh* untuk SBR-25. Analisa uji indentasi gesek menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* Abaqus 6.14-5 yang merupakan salah satu *software* metode elemen hingga yang populer digunakan [9]. Selain itu *software* Abaqus 6.14-5 menyediakan fasilitas analisa non-linier untuk mekanika kontak.

Jenis material *hyperelastic* yang digunakan mempunyai *strain energy function* model *Yeoh* untuk SBR-25, dengan nilai konstanta $C_{10} = 0,337\text{MPa}$, $C_{20} = -0,0053\text{MPa}$, $C_{30} = 0,0005\text{MPa}$, $D = 0,062(\text{Mpa})^{-1}$ dan nilai densitasnya sebesar $\rho = 0,00112\text{g/mm}^3$ [10]. Variasi kekasaran permukaan kontak diwakili oleh koefisien gesek adhesi yang divariasikan sebesar 0,0, 0,15, 0,5 dan 1,0. Hasil yang didapat dari penelitian ini yaitu berupa gaya reaksi, koefisien gesek *hysteresis*, dan koefisien gesek total terhadap perpindahan atau pergeseran indenter.

2. Material Dan Metodologi Penelitian

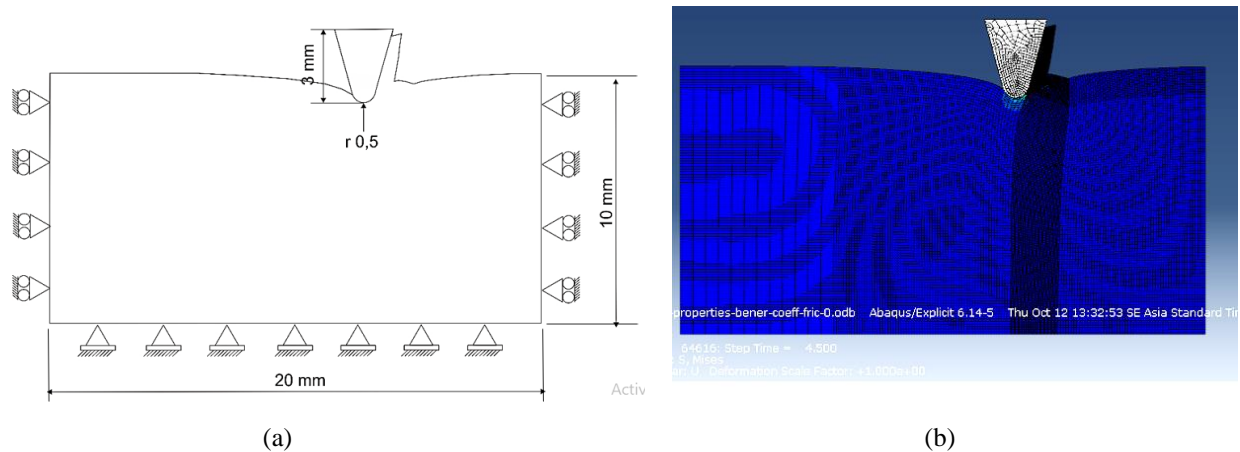
Gambaran kasus dari penelitian ini dimodelkan dalam bentuk 2 dimensi (*plane strain*) dengan geometri yang dijelaskan pada Gambar 1. Sisi kanan dan kiri *elastomer* ditumpu pada arah horizontal dan dapat bergerak bebas arah vertikal, sedangkan bagian bawah *elastomer* ditumpu mati. Penyelesaian kasus ini dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* Abaqus 6.14-5. Indentasi dilakukan dengan memberi kedalaman tertentu, kemudian memberikan perpindahan indenter pada arah horizontal [11-12].

Gambar 1 merupakan skema pemodelan pemodelan untuk *Finite Element* dan *meshing* yang terjadi dari *elastomers* dimana *elastomers* tersebut diibaratkan memiliki permukaan yang sudah terabrasi dengan permukaan yang bergerigi. Untuk menyederhanakan simulasi, pada permukaan karet atau *elastomer* ini diberikan sebuah gerigi atau geram (*chip*) dengan dimensi tertentu. Secara umum ada hubungan antara h_1 , h_2 dan sudut θ , dan yang disebut ketebalan chip di tulisan ini adalah h_1 . Panjang spesimen *elastomers* 20 mm, lebar dari *elastomers* 10 mm dan radius *indenter* disimbolkan dengan r . Pemodelan uji tekan dan geser dimulai dengan menentukan parameter dari model yang meliputi parameter material, kondisi batas dan dimensi dari *elastomers* dan *indenter*. Gambar 2 merupakan skema saat indenter mulai bergeser dan menabrak *chip*. Sebelum melakukan simulasi pada Abaqus 6.14-5 diperlukan dua *part* yaitu spesimen dan indenter yang akan digunakan untuk pemodelan.



Gambar 1. Pemodelan awal kontak gesek antara indenter dengan permukaan karet yang bergerigi
(a) Sketsa pemodelan dan (b) *meshing* pada spesimen dan indenter.

Langkah selanjutnya adalah pemberian *properties* pada kedua *part* diatas. Untuk *part elastomers* diberikan *properties* berupa masa jenis dan sifat *hyperelastic* yang diisi oleh koefisien *Yeoh* untuk SBR-25. *Properties* dari *elastomers* berupa *Strain Energy Function* (SEF) untuk simulasi dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini, termasuk *bulk modulus* dan massa jenisnya ρ . Sedang data *indenter* yang diberikan berupa masa jenis, sifat *plastic* dan *elastic*.



Gambar 2. Pemodelan kontak gesek antara indenter dengan radius $r = 0,5$ mm dan permukaan elastomer
 (a) Pemodelan saat menabrak *chip* (b) *Meshing* pada FE saat menabrak *chip*.

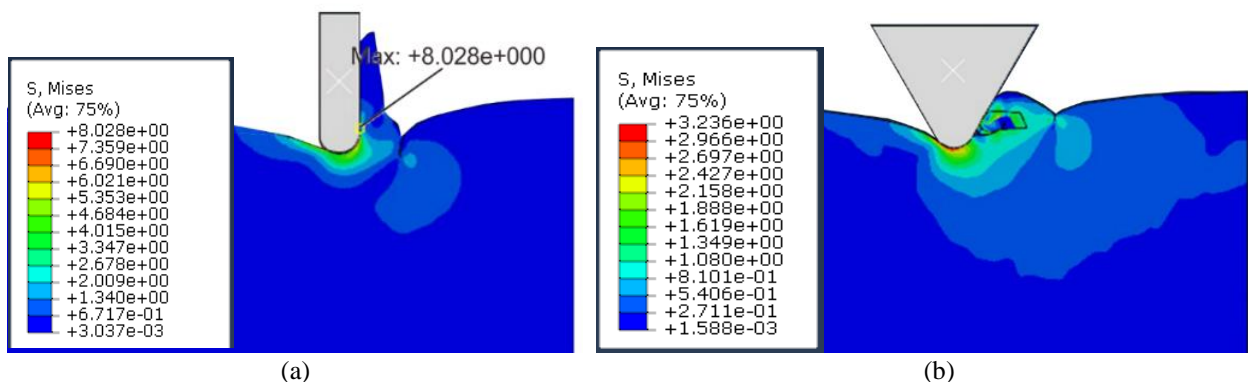
Tabel 1. Properti material yang digunakan dalam pemodelan

Materials	C10 /MPa	C20 /MPa	C30 /MPa	$D_{com.}/(MPa)^{-1}$	$\rho / g/mm^3$
SBR-25	0.337	-0.0053	0.0005	0.062	0.00112

Setelah pemberian *properties* pada kedua *part*, langkah selanjutnya adalah pemberian *step* tekan dan geser serta memberi beberapa input diantaranya kedalaman indentasi 1 mm, koefisien gesek 1, sliding horizontal sejauh 8 mm. Untuk *part indenter* dibuat rigid pada saat pemberian *boundary condition*. Langkah berikutnya adalah pemberian *mesh* pada kedua part seperti pada gambar 2 berikut ini. Langkah yang terakhir adalah *soving problem* yaitu mensimulasikan kontak gesek antara *elastomers* dan *indenter* dengan masuk ke *module job* dan menunggu hasil simulasi sampai hasilnya dapat ditampilkan dan dianalisis. Simulasi dilakukan dengan variasi nilai koefisien gesek adhesi, untuk permukaan halus sebesar 0 dan permukaan kasar sebesar 0,5. Simulasi juga dilakukan dengan variasi kedalaman indentasi dan sudut indenter. Hasil yang didapat berupa gaya reaksi dan koefisien gesek yang terjadi terhadap perpindahan atau pergeseran indenter.

3. Hasil dan Pembahasan

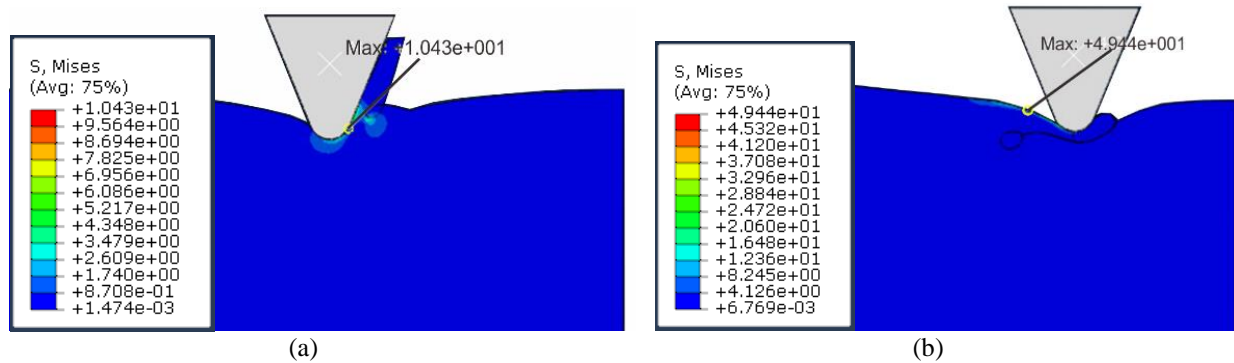
Pada pemodelan yang penulis buat total simulasi yang telah berhasil dilakukan dengan beberapa variasi kedalaman indentasi, ketebalan chip, koefisien gesek adhesi dan sudut indenter. Gambar 3 dan 4 menampilkan deformasi dan distribusi tegangan untuk permukaan karet disekitar *chip* (gerigi) dengan variasi sudut indenter 0, 45 dan 60 derajat. Dari gambar 3 terlihat bahwa tegangan maksimum untuk indenter 0 derajat (8.028 MPa) lebih besar dibanding yang 60 derajat (3.236 MPa). Posisi titik tegangan maksimum merupakan titik awal keausan (titik kritis) merupakan posisi dimana *elastomers* akan mengalami *deformasi plastis* (sobek).



Gambar 3. Kontur permukaan material *hyperelastic* pemodelan dengan kedalaman indentasi 1 mm, tebal *chip* 0,4 mm, nilai koefisien gesek 0,5. Untuk sudut indenter (a) 0 derajat dan (b) 60 derajat.

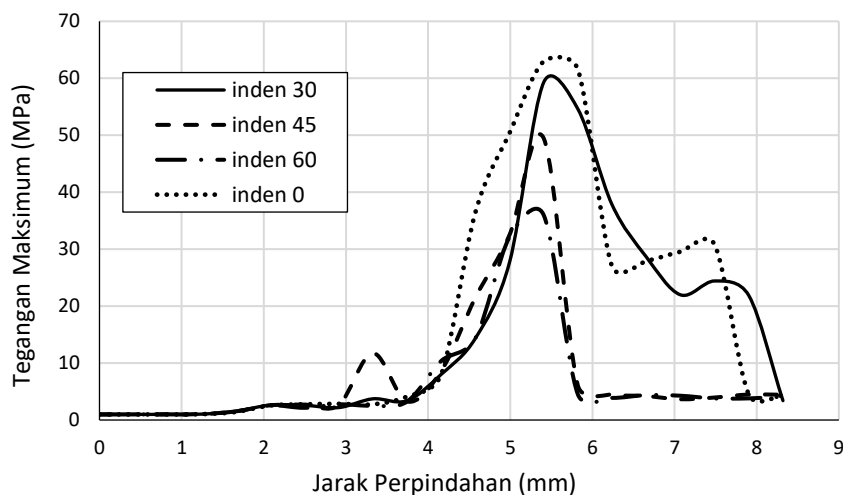
Berikut ini merupakan perbedaan letak titik kritis dengan beda koefisien gesek adhesi yaitu 0 dan 0,5 dan dengan tebal *chip* dan sudut *indenter* yang sama. Dapat dilihat dari Gambar 4 letak titik kritis dengan koefisien gesek 0 terletak

tepat di perpotongan sudut dalam *chip*, sedang pada pemodelan dengan koefisien gesek 0,5 titik kritis terdapat pada tengah-tengah *chip*. Hal ini sesuai dengan pemodelan yg telah dilakukan oleh Liang, dkk.



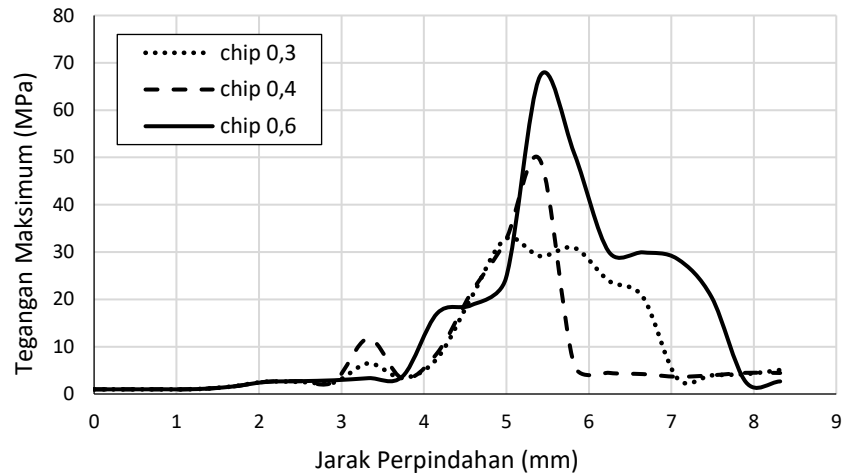
Gambar 4. Letak titik kritis pada pemodelan dengan kedalaman indentasi sebesar 1 mm, tebal *chip* 0,4 mm dan sudut *indenter* 45°. Untuk koefisien gesek adhesi (a) 0 dan (b) 0,5

Gambar 5 menunjukkan perubahan besarnya nilai tegangan maksimal yang terjadi seiring dengan semakin jauhnya perpindahan *indenter* dengan elastomers yang memiliki ketebalan *chip* sebesar 0,4 mm, kedalaman indentasi 1 mm dan koefisien gesek 0,5. Terlihat grafik yang fluktuatif, hal ini dikarenakan adanya fenomena *stick-slip*. *Stick* terjadi ketika material *elastomers* menempel pada permukaan *indenter*, menghambat gerakan *indenter* sehingga mengakibatkan nilai tegangan maksimal yang membesar, tegangan terbesar terjadi pada saat *indenter* mengenai *chip* yang mengibaratkan permukaan *elastomers* yang tidak merata karena fenomena *stick-slip* terbesar terjadi kontak antara *indenter* dengan *chip* pada *elastomers*. Dan ketika *slip* terjadi, material *elastomers* lepas dari permukaan *indenter* dan nilai tegangan maksimalnya akan mengecil. Fenomena *stick-slip* ini terjadi dengan cepat dan berulang sehingga terlihat nilai tegangan maksimal yang fluktuatif. Pemodelan dengan sudut *indenter* 0° menghasilkan nilai tegangan maksimal yang lebih tinggi dibandingkan dengan pemodelan dengan sudut *indenter* 30°, 45° dan 60°.

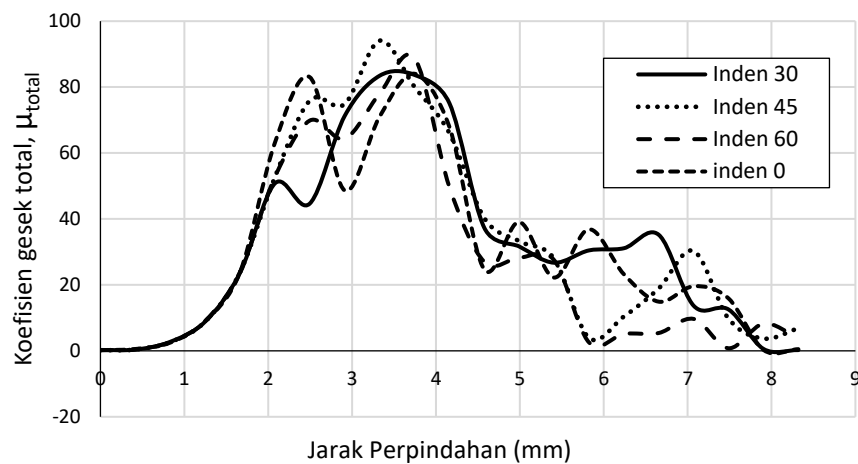


Gambar 5. Tegangan maksimum terhadap perpindahan *indenter* dengan variasi sudut *indenter*. Untuk ketebalan *chip* 0,4 mm dan koefisien gesek adhesi 0,5.

Pada pemodelan dengan parameter variasi ketebalan *chip* pada *elastomers* dengan kedalaman indentasi 1,0 mm, koefisien gesek 0,5 dan sudut *indenter* 45° terlihat hasil yang berbeda pada setiap variasinya. Pemodelan dengan variasi ketebalan *chip* sebesar 0,6 mm, menghasilkan nilai tegangan maksimal yang lebih tinggi di bandingkan dengan ketebalan *chip* 0,3 dan 0,4. Dengan nilai koefisien gesek sebesar 0,5 pada ketiga percobaan pada *chip* yang berbeda terlihat hasil grafik yang fluktuatif seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Tegangan maksimal terhadap perpindahan *indenter* dengan variasi ketebalan *chip* pada *elastomers*. Sudut *indenter* 45 derajat dan koefisien gesek adhesi 0,5.



Gambar 7. Nilai koefisien gesek total terhadap perpindahan *indenter* dengan variasi sudut *indenter*. Simulasi dilakukan untuk tebal *chip* 0,4 mm dan koefisien gesek adhesi 0,5.

Pada pemodelan dengan parameter variasi sudut *indenter* dengan kedalaman indentasi 1,0 mm, koefisien gesek adhesi 0,5 dan tebal *chip* 0,4 mm seperti pada Gambar 7 menunjukkan perubahan besarnya nilai koefisien gesek total μ_{total} yang terjadi seiring dengan semakin jauhnya perpindahan *indenter*. Terlihat grafik yang fluktuatif, hal ini dikarenakan adanya fenomena *stick-slip*. *Stick* terjadi ketika material *elastomers* menempel pada permukaan *indenter*, menghambat gerakan *indenter* sehingga mengakibatkan nilai koefisien gesek deformasi (*hysteresis*) semakin besar. Dan ketika *slip* terjadi, material *elastomers* lepas dari permukaan *indenter* dan nilai koefisien gesek deformasi akan mengecil. Fenomena *stick-slip* ini terjadi dengan cepat dan berulang sehingga terlihat nilai koefisien gesek deformasi yang fluktuatif. Pemodelan dengan variasi sudut *indenter* 45° menghasilkan nilai koefisien gesek total lebih tinggi, daripada sudut *indenter* 0°, 30° dan 60°.

4. Kesimpulan

Kajian mengenai kontak *hyperelastic* menggunakan metode elemen hingga ini telah menunjukkan karakteristik material *hyperelastic* ketika terjadi kontak. Dari hasil simulasi variasi sudut *blade indenter* dapat menghasilkan beberapa *output* diantaranya distribusi tegangan maksimal, respon gaya ketika terjadi kontak tekan dan geser oleh *indenter*, kontur dari material *hyperelastic* dan posisi awal indikasi keausan (*retak*) pada *elastomers*. Maka didapat suatu hasil yaitu pengaruh sudut *indenter* serta ketebalan *chip* terhadap hasil *output* yang dihasilkan. Dari serangkaian hasil simulasi tersebut didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu: emakin kecil sudut θ pada *indenter* maka semakin besar nilai tegangan maksimumnya dan semakin besar juga tingkat deformasinya; terdapat perbedaan titik awal tegangan kritis (maksimum) *elastomers* pada koefisien gesek 0 dan 0,5. Pada koefisien gesek adhesi 0, titik awal tegangan kritis terdapat pada leher *chip*, sedang pada koefisien gesek 0,5 terjadi pada pertengahan batang *chip*; nilai besar tegangan maksimum pada tiap pemodelan dengan variasi ketebalan *chip* dan dengan sudut *indenter* yang sama dengan tebal *chip* 0,3 mm memiliki *maximum stress* sebesar 32,81 MPa, tebal *chip* 0,4 mm memiliki *maximum stress* sebesar 49,44 MPa dan tebal *chip* 0,6

mm memiliki *maximum stress* sebesar 67,18 Mpa; dan nilai koefisien gesek deformasi (hysteresis) pada tiap pemodelan dengan variasi sudut dan dengan ketebalan *chip* yang sama yaitu 0,4 mm, sudut indenter $\theta = 30^\circ$ memiliki koefisien gesek histerisis sebesar 83,19, sudut $\theta = 45^\circ$ memiliki koefisien gesek histerisis sebesar 93,58 dan sudut $\theta = 60^\circ$ memiliki koefisien gesek histerisis sebesar 88,29.

Daftar Pustaka

- [1] Setiyana B., Ismail R., Jamari J., Schipper D., 2016, "Stick-slip behaviour of a viscoelastic flat sliding along a rigid indenter," *Journal of Tribology Online* 11, 4, 512-518.
- [2] Nakano, K., Maegawa, S., 2010, "Occurrence limit of stick-slip: dimensionless analysis for fundamental design of robust-stable systems", *Lubrication Science* 22, 1-18.
- [3] Fukahori Y., Yamazaki H., 1994, "Mechanism of rubber abrasion," *Wear* 178(1) 109-116.
- [4] Barquins, M., 1993, "Friction and wear of rubber-like materials", *Wear* 160, 1-11.
- [5] Payne, N. G., Bayer, R. G., 1991, "Friction and wear tests for elastomers", *Wear* 150, 67-77.
- [6] Liang, H., Fukahori, Y., Thomas, A.G., Busfield J. C., 2006, "Rubber abrasion at steady state", *Wear* 266, 288-296.
- [7] Coveney, V., Menger, C., 1999, "Initiation and development of wear of an elastomeric surface by a blade abrader", *Wear* 233-235, 702-711.
- [8] Setiyana, B. R. Ismail, R., Jamari, J., Schipper, D. J., 2018, "An analytical study of the wear pattern of an abraded rubber surface: the interaction model", *Tribology, Material Surface and Interfaces* 412-413, 23-29.
- [9] ABAQUS 6.11, 2011, "Standard User's Manual," Dassault Systems Simulia Corp., USA.
- [10] Liang, H., 2007, "Investigating the Mechanism of Elastomer Abrasion," Ph.D. thesis, University of London. London.
- [11] Setiyana B., Ismail R., Jamari J., Schipper D., 2017, "A Numerical Investigation of Mechanical Behavior of unfilled styrene-butadiene rubber by static straight blade indentation," *Journal of Mechanical Engineering*, SI 1 (1) 45-53.
- [12] Setiyana B., Ismail R., Jamari J., Schipper D., 2017, "A Numerical Investigation of the Friction Contact of an Unfilled Styrene Butadiene Rubber by a Blade Sliding Indentation," *International Conference of Computation on Science and Engineering (ICCSE)*, Bandung Institute of Technology, Bandung.