

Rolling-sliding Contacts and It's Applications: A Review

E. Saputra¹⁾, Kurniawan¹⁾, R. Ismail^{1,2)}, M. Tauvqirrahman^{1,2)}, Jamari¹⁾, and D. J. Schipper²⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, University of Diponegoro, Semarang
Address: Jl. Prof. Sudharto, UNDIP Tembalang, Phone: 024-7460059 ext. 115

²⁾ Laboratory for Surface Technology and Tribology, Faculty of Engineering Technology,
University of Twente, Enschede, The Netherlands
E-mail : eko_singgagah@yahoo.com

Abstract

Tribology science is one of the applied sciences in mechanical engineering which focuses on the investigation of interacting surfaces in relative motion and its consequences. This science is related to the friction, wear and lubrication which control the lifespan of the contacting system. Some of the mechanical components such as: gears, wheels and rails, and roller bearings perform the rolling-sliding contact on their contacting surface. For example in the spur gears contact, the engineer should consider the contact pressure, deformation, and wear fundamentally in order to get the best performance. This paper objective is reviewing some rolling-sliding contact model and to choose the appropriate model to be combined with the developed ellipsoid contact model. The combination between rolling-sliding contact model with developed contact model will be applied in micro-scale contact on the real engineering surface. The stick-slip regions between the two contacted surfaces acts as the factor in determining the rolling-sliding contact situation. The finite element analysis (FEA) is used to compare one of the published rolling-sliding contact model. A good agreement is found one of analytical model, FEA model and the recent FEA results. The transient in rolling-sliding contact occurs at the start of rolling contact and it is followed with the steady state situation.

Keyword: *rolling-sliding contact, slip, finite element analysis*

1. Pendahuluan

Ilmu tribologi adalah ilmu yang mempelajari tentang hubungan interaksi antara permukaan yang saling kontak. Bidang ilmu ini sangat luas dan banyak kita jumpai dalam kehidupan sehari-hari, sebagai contoh: dalam bidang teknik mesin (kontak antara roda dengan jalan, kontak antar roda gigi, kontak antara piston dengan blok silinder, kontak antara *rocker arm* dengan *camshaft* dll), dalam bidang medis (kontak antar gigi, kontak antara telapak kaki dengan alas yang dipijak, hubungan persendian pada lutut, kontak antara permukaan kapsul *endoscopy* dengan usus dll).

Ilmu ini berkaitan dengan gesekan, keausan dan pelumasan yang mengontrol umur dari komponen yang saling kontak. Beberapa komponen mekanik seperti: *gears, wheel and rails*, dan *roller bearings* menunjukkan sistem kontak *rolling-sliding* pada permukaan kontakannya. Sistem kontak *rolling* akan menyebabkan terjadinya deformasi antara dua permukaan kontak, sedangkan sistem kontak *sliding* akan menyebabkan keausan pada permukaan yang saling kontak. Kemudian jika sistem kontakannya adalah *rolling-sliding* maka yang terjadi adalah adanya deformasi dan keausan, yang mana kedua efek ini sangat penting untuk diperhatikan, karena berkaitan dengan umur pakai suatu komponen permesinan. Saat ini telah banyak penelitian tentang *rolling* dan *sliding* secara terpisah, namun hanya sedikit penelitian mengenai sistem kontak *rolling-sliding* secara bersamaan. Oleh karena itu diperlukan penelitian lebih lanjut tentang sistem kontak *rolling-sliding*.

Beberapa penelitian tentang kontak *rolling-sliding* telah dilakukan menggunakan metode eksperimen, analitik dan metode FEM (*finite element method*). Arias-Cuevas dkk melakukan eksperimen kontak *rolling-sliding* skala laboratorium dengan modifikasi

gesekan pada kontak *wheel-rail* dalam kondisi kering dan basah. Tujuannya adalah untuk menyelidiki performa *two adhesion enhancers* dalam kondisi kontak kering dan basah [1]. Hegadekatte dkk melakukan simulasi *rolling-sliding* menggunakan FEM sebagai ‘*Wear-processor*’ untuk memprediksi keausan pada *gear teeth flanks* [2]. Farley dkk melakukan eksperimen dan pemodelan FEM untuk menganalisa permukaan yang mempunyai lapisan (*layer*) dibawah kondisi kontak *rolling-sliding* [3]. Kapoor dan Johnson menganalisa perubahan geometri kontak pada kondisi *shakedown* dalam kontak *rolling-sliding* [4]. Boucly dkk membuat model kontak *rolling* dan *sliding* antar asperiti yang berbentuk bola [5]. Ham dkk melakukan analisa *repeated* elemen hingga *elastic-plastic*, 2D kontak *rolling-sliding* yang berbentuk silinder dengan plat tebal [6]. Dahlberg dan Alfredsson melakukan kontak silinder *rolling transient* dengan penerapan slip konstan dan meningkat secara linier [7].

Setelah melakukan tinjauan ulang beberapa paper yang berhubungan dengan sistem kontak *rolling-sliding*. Maka penulis akan mengulangi pekerjaan Dahlberg dan Alfredsson [7]. Hasilnya kemudian dibandingkan dengan hasil yang ada pada paper untuk verifikasi. Selanjutnya metode pekerjaan yang dipakai pada paper tersebut akan dikembangkan untuk mengerjakan kasus yang sama tetapi dengan geometri berbeda.

2. Metodologi

Ada dua metode yang digunakan untuk mengerjakan ulang pada paper ini, yaitu metode analitik dan metode elemen hingga.

a. Metode Analitik

Ada dua kurva yang dibangun dari beberapa persamaan, pada paper ini akan ditampilkan persamaan akhir yang telah terbentuk. Penurunan persamaan penyusunnya dapat dilihat pada referensi [7].

- Beban traksi *transient rolling* dengan slip konstan, dimulai dari kontak stasioner.

$$\frac{Lk}{\alpha E^*} = \frac{\pi}{2} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Q}{\pi P}\right)} + \left(1 - \frac{sR^*}{\mu \alpha}\right) \ln \left(\frac{sR^*/\mu \alpha}{(sR^*/\mu \alpha) - 1 + \sqrt{1 - \left(\frac{Q}{\pi P}\right)}} \right) \right] \quad (1)$$

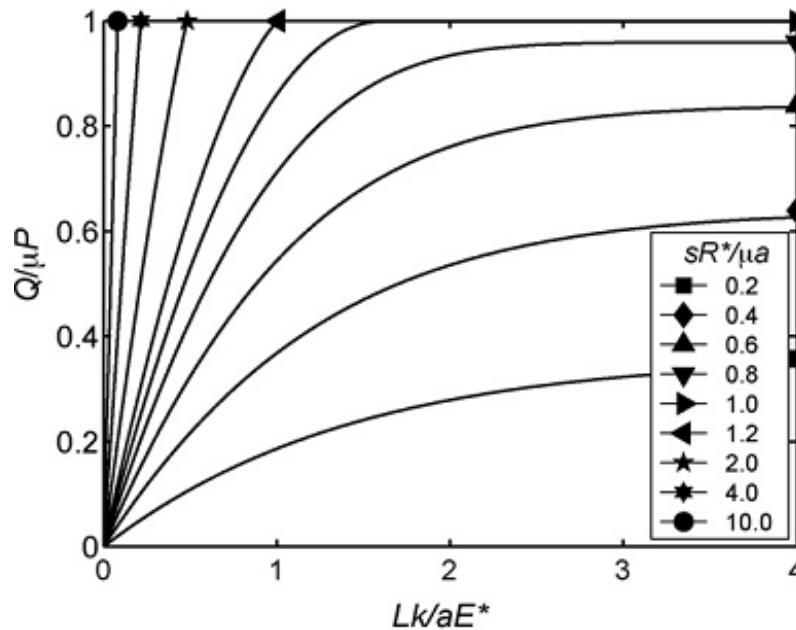
Persamaan ini valid untuk $Q < \mu P$. Aplikasinya dapat kita lihat pada Gambar 1. Data-data perhitungan analitik tercantum pada Tabel 1

Tabel 1: Data-data perhitungan analitik [7]

Variabel	Nilai
E	206 GPa
P	932 N/mm
$R_1 = R_2$	6.8
ν	0.3
μ	0.3, 0.05
β	0
k	13740 N/mm ²

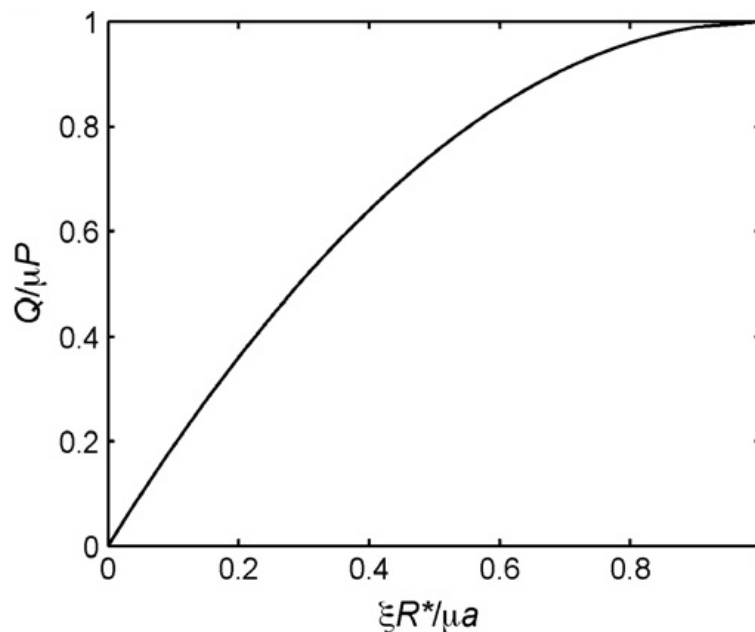
Setelah kita memasukkan data-data yang disediakan ke dalam persamaan-persamaan sebelumnya yang dapat dilihat pada referensi [7], maka akan kita

dapatkan nilai-nilai yang dibutuhkan untuk selanjutnya disusun dalam bentuk kurva dan akan ditampilkan pada bagian hasil dari paper ini.



Gambar 1: Beban traksi menurut pers. (1), yaitu *transient rolling* dengan slip konstan, dimulai dari kontak stasioner [7]

- Kurva *creep* pada *steady-state rolling* menurut Carter. Jika $sR^*/\mu a < 1$, misal $s < s_{limite} = \mu a/R^*$, maka terdapat *singularity* pada pers. (1) untuk $Q/\mu P = Q_{creep}/\mu P = 1 - (1 - sR^*/\mu a)^2$, sesuai kondisi *steady creep* dengan $s = \xi$ misal pada traksi Carter. Persamaan di atas, $s > s_{limite} = \mu a/R^*$, valid untuk *start* sampai *gross sliding*. Untuk $s < s_{limite} = \mu a/R^*$, pers. (1) valid dari *start* sampai $Q = Q_{creep}$, yang tercapai secara *assymtot*. Maka jarak *transient rolling* ini disebutkan sebagai panjang dimana $Q = Q_{creep}$ mencapai prosentase yang sesuai. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2: Kurva *creep* pada *steady state rolling* menurut Carter [7]

b. Metode elemen hingga

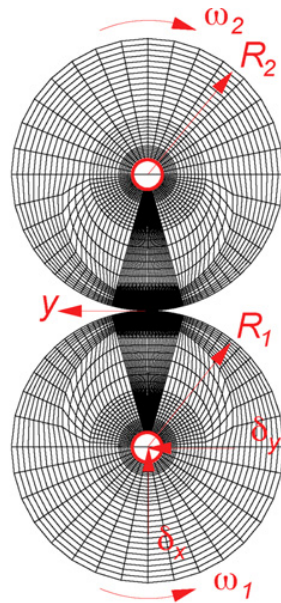
Metode Elemen Hingga atau FEM (*finite element method*) digunakan untuk mengetahui fenomena *transient rolling* dan melakukan verifikasi terhadap hasil yang ada pada paper [7]. Oleh karena itu, dilakukan simulasi dengan Metode Elemen Hingga. Jika hasil simulasi dengan hasil paper sudah sesuai, maka parameter-parameter yang telah diidentifikasi tersebut dapat digunakan untuk pengembangan simulasi pada geometri lain.

Pemodelan yang dibuat menggunakan dua buah silinder berukuran $R_1 = R_2$, model *plane strain* dua dimensi (2D), *quasi static*, material elastis sempurna, dengan pengaruh panas diabaikan. Pada tiap pusat silinder dipasang hub untuk menerapkan gerakan dan rotasi. Data pemodelan lebih lengkap dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2: Parameter-parameter untuk pemodelan *rolling contact* [7]

Variabel	Nilai
E	206 GPa
P	932 N/mm
$R1=R2$	13.6
ν	0.3
μ	0.3, 0.05
β	0
k	13740 N/mm ²
Tipe Nodal dan elemen	Plane strain CPE4R
Nodal stick (e) = Max. relative slip	$\frac{1}{285} \times 14.2 \mu\text{m} = 0.05 \mu\text{m}$
Ω total	5.8 mm \approx 24°

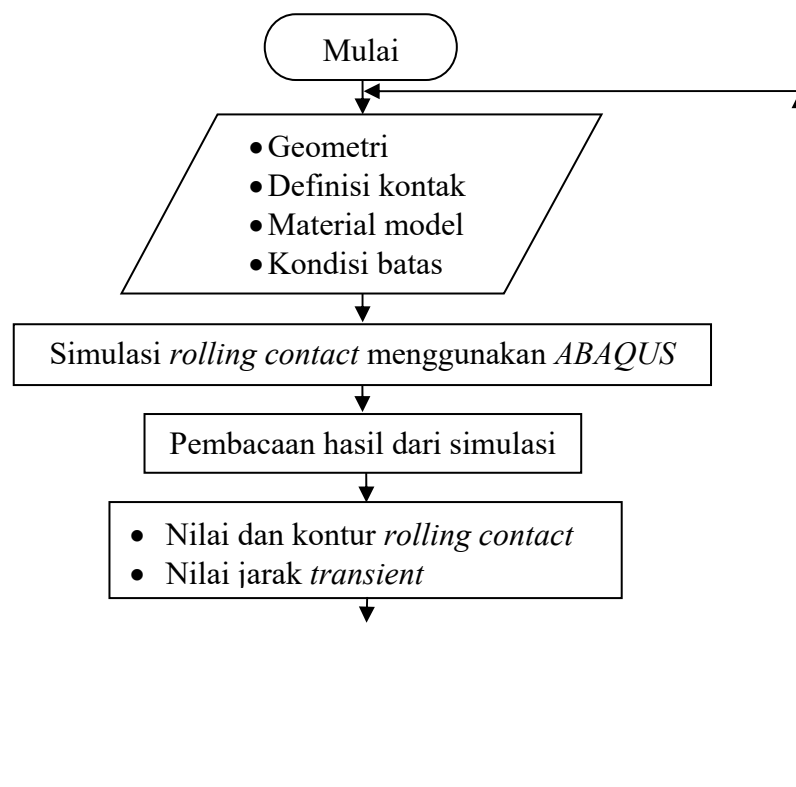
Dalam pemodelan, silinder dibagi menjadi elemen-elemen kecil dengan ukuran tertentu yang disebut *mesh*. Elemen terkecil, yaitu pada bagian yang mengalami kontak, adalah 14.2 μm (0.0142 mm). Elemen yang tidak memerlukan pengamatan ekstra, diperkenankan memiliki ukuran lebih besar untuk membantu mempercepat waktu simulasi.

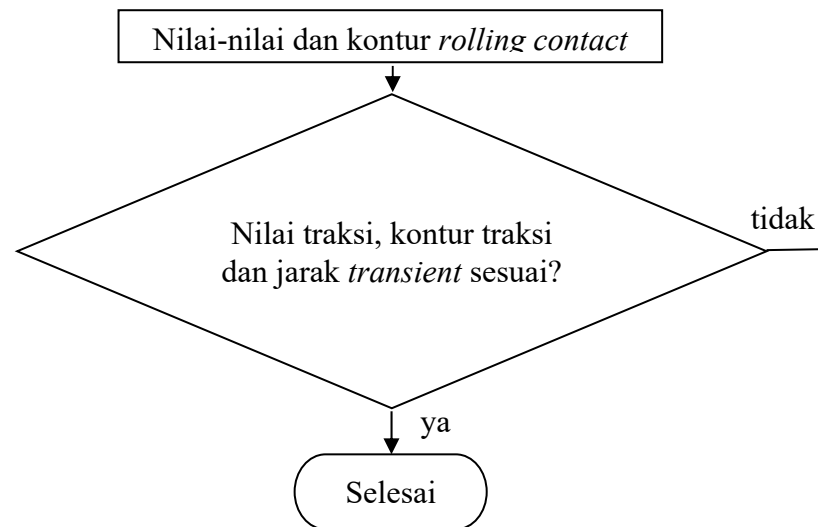


Gambar 3: Meshing dalam pemodelan [7]

Setengah bagian silinder atas dipartisi menjadi dua bagian, kemudian masing-masing bagian dibagi menjadi delapan buah elemen. Menggunakan *sweep* dan *minimize mesh transition*, bagian hub diperhalus dengan membagi menjadi 16 bagian, kemudian pada bagian tengah silinder hingga menuju ke daerah kontak, menggunakan *bias* dengan rasio 20, sejumlah 16 elemen. Seluruh pembagian menggunakan *constraint* agar jumlah nodal tidak berubah. Hasil meshing dari pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3.

Kondisi batas diterapkan pada kedua silinder. Pertama, identasi, untuk silinder 2 (atas), ditetapkan tidak dapat bergerak ke arah x (vertikal) dan y (horisontal), sehingga $U_1 = U_2 = 0$ serta $(UR_3) = 0$. Silinder 1 (bawah) boleh bergerak searah sumbu- x tetapi tidak dapat bergerak searah sumbu- y , serta tidak dapat berotasi ke semua arah ($U_1 = UR_3 = 0$). Kedua, saat *rolling*, UR_3 pada kedua silinder dinonaktifkan. Dibuat kondisi batas baru dengan UR_3 yang berbeda pada kedua silinder. Hal ini dimaksudkan agar terjadi slip yang diinginkan. Slip dikontrol sedemikian rupa sehingga $Q/\mu P$ berada pada nilai tertentu.





Gambar 4: Diagram alir untuk simulasi *rolling* dengan FEM

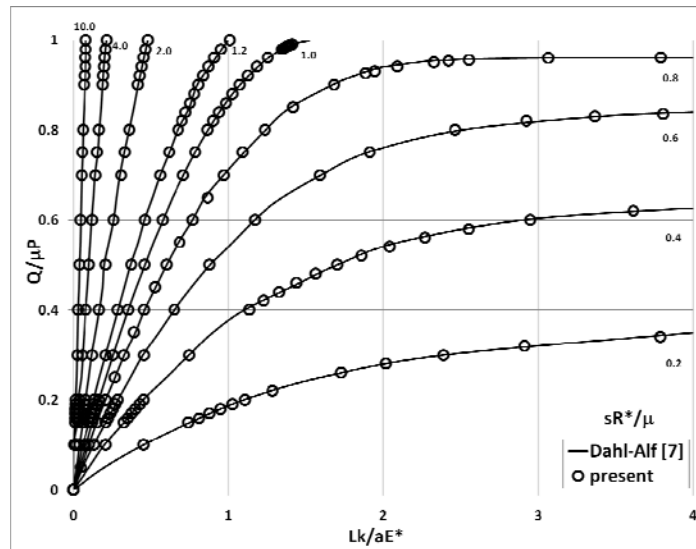
Pemodelan yang dilakukan dapat dilihat pada diagram alir Gambar 4. Dua buah silinder dengan radius sama, R , digunakan sebagai model. *Rolling* dimulai dengan proses indentasi, dilanjutkan *rolling* dengan slip yang terkontrol [7]. Penyelesaian permasalahan ini dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan software ABAQUS 6.5-1 [8].

Setelah dilakukan simulasi, maka hasil berupa tegangan, lebar kontak, dan kontur *slip-stick* dapat dibandingkan dengan hasil dari paper [7]. Kemudian hasil dibandingkan dengan hasil penyelesaian secara analitik. Spesifikasi komputer yang digunakan untuk simulasi oleh penulis adalah Intel Core2Duo dengan RAM tiga Gigabyte (3 GB) dan waktu yang ditempuh untuk sekali *running* sekitar tujuh jam dengan ukuran file hasil (*.ODB) 9 GB.

3. Hasil

Setelah menjelaskan review penggunaan metode analitik dan metode elemen hingga pada bagian metodologi, maka pada bagian hasil, akan ditampilkan perbandingan hasil-hasil dari paper [7] untuk diverifikasi.

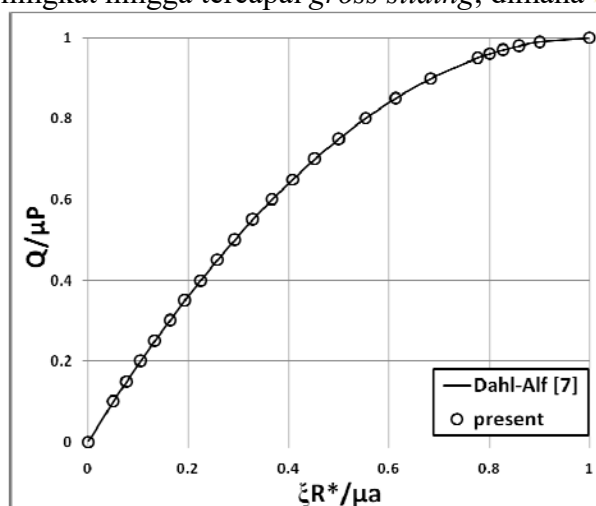
a. Hasil analitik



Gambar 5: Fenomena perubahan beban traksi selama periode *transient* dengan aplikasi slip konstan [7]

Pada Gambar 5, dapat dilihat bahwa beban traksi meningkat hampir linear terhadap jarak rolling yang telah dinormalisasi. Peningkatan ini terus terjadi hingga tercapainya suatu *gross sliding*. Untuk parameter slip yang telah dinormalisasi, terlihat bahwa jarak tercapainya *gross sliding* berbanding terbalik dengan besaran slip. Jika slip yang terjadi semakin besar, maka jarak *transient rolling* akan menjadi lebih pendek, demikian sebaliknya [7]. Diperoleh kesesuaian yang sangat baik dengan penelitian yang dilakukan oleh Dahlberg dan Alfredson [7]. Disimpulkan bahwa secara analitik, untuk fenomena perubahan beban traksi selama periode *transient* dengan aplikasi slip konstan telah dapat dimodelkan dengan baik.

Kemudian, hasil perhitungan dibandingkan dengan kurva *creep* pada *steady-state rolling* menurut Carter [9] pada $Q/\mu P$ yang bervariasi [7]. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 6. Diperoleh kesamaan dengan hasil pada paper [7]. Terlihat pada Gambar 6 bahwa *creep* akan meningkat hingga tercapai *gross sliding*, dimana $Q/\mu P = 1$.

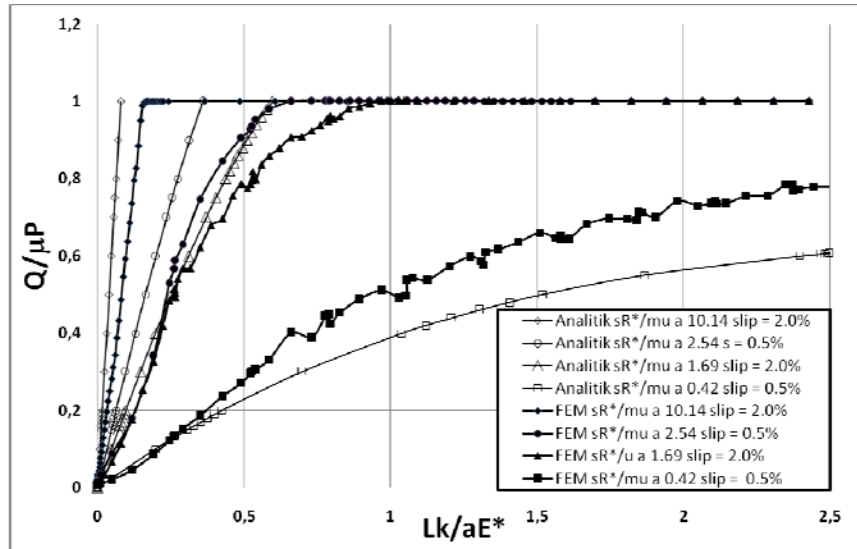


Gambar 6: Perbandingan kurva *creep steady-state rolling* dengan variasi $Q/\mu P$ menurut Carter [7]

b. Hasil metode elemen hingga

- **Peningkatan Beban Traksi**

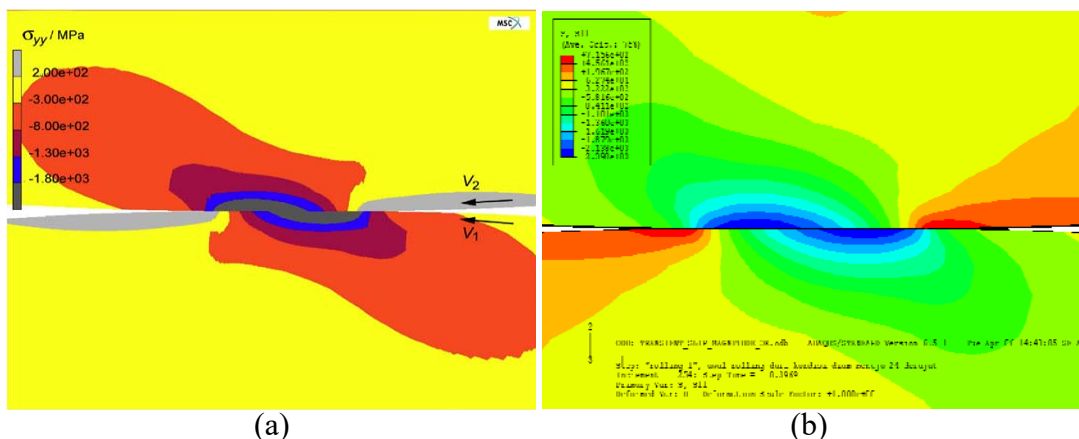
Dilakukan verifikasi model dengan hasil analitik untuk mengamati fenomena peningkatan beban traksi dengan aplikasi *slip* konstan pada nilai tertentu. Terlihat bahwa besaran nilai hasil FEM telah sesuai dengan Carter dengan penyimpangan rata-rata 5%. Fenomena peningkatan beban traksi disajikan dalam Gambar 7.



Gambar 7: Perbandingan peningkatan beban traksi dengan aplikasi slip konstan [7]

- **Bentuk Kontur Tegangan Arah y (σ_{yy})**

Agar hasil terlihat lebih jelas, penulis menyajikan kontur tegangan searah sumbu-y (σ_{yy}) pada kondisi *gross sliding* dari hasil pemodelan dan paper. Gambar kontur dapat dilihat pada Gambar 8, untuk (a) dari paper, (b) *present model*. Terlihat fenomena tegangan *assimetris*, dengan nilai yang sama namun arah yang berlawanan pada masing-masing silinder.



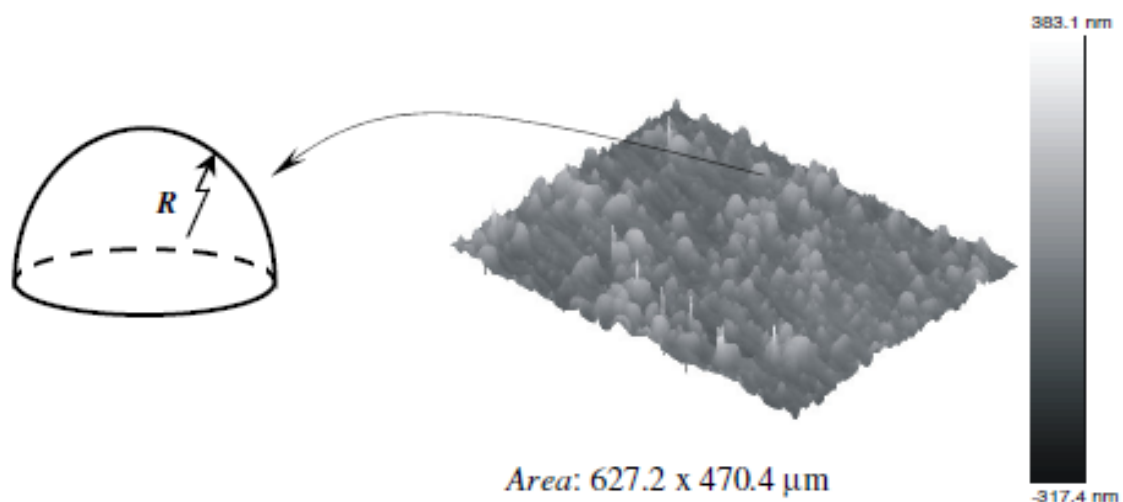
Gambar 8: Kontur tegangan searah sumbu-y (σ_{yy}), (a) menurut Dahl-Alf [7] dan (b) *Present model*

4. Diskusi

Pada perbandingan di atas, dapat dilihat bahwa hasil yang diperoleh telah sesuai dengan hasil sebelumnya, sehingga dapat disimpulkan penulis mampu memverifikasi

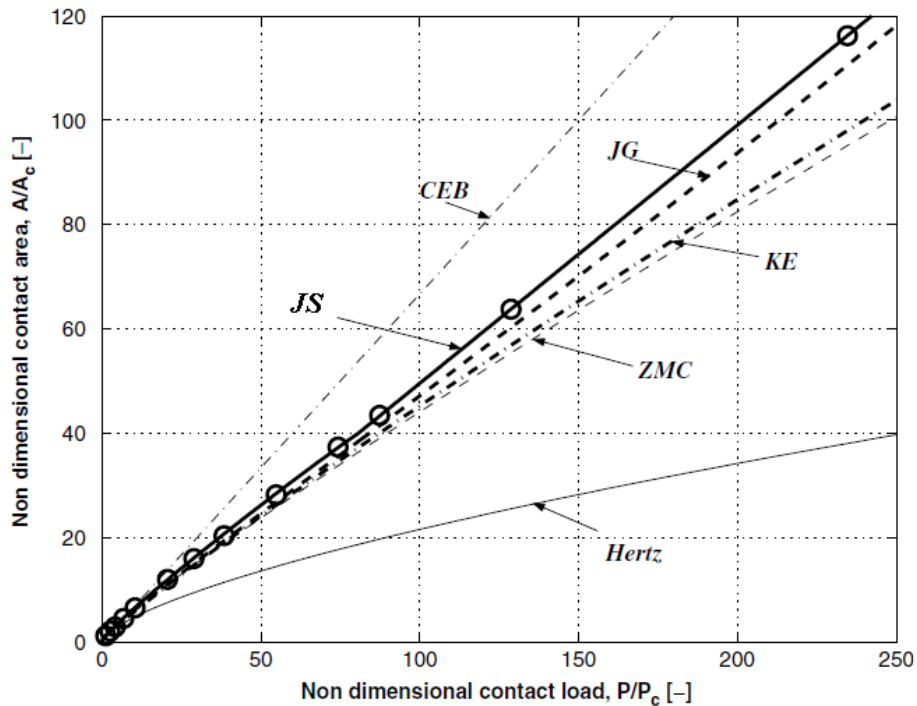
dengan metode yang sama dengan apa yang telah dikerjakan peneliti sebelumnya. Metode yang digunakan sebelumnya masih menggunakan model silinder vs silinder dengan aplikasi *wheel rail* pada level makro, akan tetapi jika kita amati lebih jauh tentang sistem kontak yang terjadi pada permukaan suatu komponen permesinan, maka sistem kontak yang terjadi sebenarnya adalah pada level mikro.

Bentuk permukaan teknik (*engineering surface*) yang terlihat sebenarnya adalah kasar berupa tonjolan-tonjolan yang dinamakan *asperity*, dapat dilihat pada Gambar 9. Sistem kontak pada level mikro telah dimodelkan oleh beberapa peneliti, diantaranya adalah Chang dkk. (CEB model) [11], Jackson-Green (JG model) [12], Kogut-Etsion (KE model) [13], Zhao dkk (ZMC model) [14] dan Jamari-Schipper (JS model) [15].



Gambar 9: Bentuk permukaan sebenarnya dari suatu komponen permesinan [15]

Hasil eksperimen kontak *elastic-plastic* dari Chaudhri [16] digunakan sebagai validasi seluruh model yang telah disebutkan di atas. Dari beberapa model yang telah ada, dan dilakukan perbandingan ternyata JS model yang saat ini paling baik hasilnya, untuk melihat perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 10 yang menunjukkan tekanan kontak rata-rata tak berdimensi $p/(chH)$ sebagai fungsi dari luas kontak tak berdimensi A/A_c untuk material *phosphor-bronze* dan *brass*, akan tetapi beberapa model yang telah dikerjakan tersebut masih digunakan untuk sistem kontak statis, belum digunakan untuk sistem kontak *rolling-sliding*. Pada paper ini, untuk penelitian selanjutnya diusulkan menggunakan kombinasi metode pekerjaan Dahlberg dan Alfredson dengan menggunakan JS model untuk menganalisa sistem kontak *rolling-sliding* pada level mikro.



Gambar 10: Perbandingan hasil beberapa model kontak antar *asperity* [15]

5. Kesimpulan

Sistem kontak *rolling-sliding* merupakan sistem kontak gabungan antara *rolling* dan *sliding*. Akibat gerak *rolling-sliding* pada permukaan adalah adanya deformasi dan keausan. Deformasi dan keausan merupakan faktor penting yang berpengaruh terhadap umur pakai dari suatu komponen permesinan. Beberapa informasi telah digali sebagai *paper survey*, untuk mengetahui hal-hal apa saja yang telah dikerjakan oleh peneliti lain berkaitan dengan kasus sistem kontak *rolling-sliding*.

Ada beberapa metode yang telah dipakai, diantaranya menggunakan metode eksperimen, metode analitik dan metode elemen hingga. Kemudian penulis mengambil salah satu paper untuk diverifikasi. Hasil dari verifikasi tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil dari paper acuan. Ternyata hasil pekerjaan penulis telah cocok, dan dapat disimpulkan penulis telah mampu menggunakan metode yang ada pada paper tersebut.

Pada paper ini penulis akan mengembangkan penelitian tentang sistem kontak *rolling-sliding* pada level mikro, dengan pertimbangan kontak sebenarnya dari permukaan suatu komponen permesinan. Banyak model kontak antar asperiti yang telah ditawarkan, dan penulis akan mengambil JS model *ellipsoid vs ellipsoid* untuk dijadikan model pada penelitian selanjutnya, menggunakan metode yang telah dibuktikan sebelumnya pada paper ini.

Referensi

- [1] Arias-Cuevas, O., Li, Z., Lewis, R., Gallardo-Hernandez, E.A., “*Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts*”, wear, 268 (2010), 543-551.
- [2] Hegadekatte, V., Hilgert, J., Kraft, O., Huber, N., “*Multi time scale simulations for wear prediction in micro-gears*”, wear, 268 (2010), 316-324.

- [3] Farley, J., Wrobel, L.C., Mao, K., “*Performance evaluation of multilayer thin film coatings under mixed rolling-sliding dry contact conditions*”, wear, 268 (2010) 268-276.
- [4] Kapoor, A., Johnson, K.L., “*Effect of changes in contact geometry on shakedown of surfaces in rolling/sliding contact*”, Int. J. Mech. Sci. Vol. 34. No. 3, (1992), pp. 223-239.
- [5] Boucly, V., Nelias, D., Green, I., “*Modeling of the rolling and sliding contact between two asperities*”, ASME Journal of Tribology, Vol. 129 (2007)
- [6] Ham, G., rubin, C.A., Hahn, G.T., Bhargava, V., “*Elasto-plastic finite element analysis of repeated, two-dimensional rolling-sliding contacts*”, Transactions of the ASME Journal of Tribology, Vol. 110 (1988)
- [7] Dahlberg, J., Alfredsson, B., “*Transient rolling of cylindrical contacts with constant and linearly increasing applied slip*”, Wear, 266 (2009), 316–326.
- [8] ABAQUS. V 6.5-1. Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc., Providence, RI, USA. (2004).
- [9] Bhargava, V., Hahn, G.T., and Rubin, C.A., “*An Elastic-Plastic Finite Element Model of Rolling Contact: Part 1: Analysis of Single Contacts*”, ASME Journal Of Applied Mechanics, Vol. 51 (1984).
- [10] Bhargava, V., Hahn, G.T., and Rubin, C.A., “*An Elastic-Plastic Finite Element Model of Rolling Contact: Part 2: Analysis of Repeated Contacts*”, ASME Journal Of Applied Mechanics, Vol. 52 (1985).
- [11] Chang, W.R., Etsion, I. and Bogy, D.B., “*An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces*,” ASME-Journal of Tribology 109, (1987), pp. 257 – 263.
- [12] Jackson, R.L. and Green, I., “*A finite element study of elasto-plastic hemispherical contact against a rigid flat*,” ASME-Journal of Tribology 127, (2005), pp. 343 – 354.
- [13] Kogut, L. and Etsion, I., “*Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat*,” ASME-Journal of Applied Mechanics 69, (2002), pp. 657 – 662.
- [14] Zhao, Y., Maietta, D.M. and Chang, L., “*An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow*,” ASME-Journal of Tribology 122, (2000), pp. 86 – 93.
- [15] Jamari, J., Schipper. D.J., “*An elastic–plastic contact model of ellipsoid bodies*” Tribology Letters, Vol. 21, No. 3, March (2006).
- [16] Chaudhri, M.M., Hutchings, I.M. and Makin, P.L., “*Plastic compression of spheres*,” Philosophical Magazine A 49, (1984), pp. 493 – 503.