

PERHITUNGAN KEAUSAN PADA KONTAK *ROLLING-SLIDING*

Eko Saputra^{1*}, Rifky Ismail², Muhammad Tauviquirrahman², dan Jamari²

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Program Pascasarjana Universitas Diponegoro

²Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang 50275

*E-mail : Esaputra2007@gmail.com

ABSTRAK

Kontak *rolling-sliding* adalah suatu fenomena kontak yang terjadi pada proses gerak putar antar benda, dimana gerak *rolling* (*pure rolling*) disertai dengan *sliding*. Salah satu efek dari kontak *rolling-sliding* adalah terjadinya *slip* dimana kecepatan putar permukaan satu dengan yang lain tidak sama. Kontak *rolling-sliding* mengakibatkan keausan pada permukaan yang saling kontak. Sebagai contoh, fenomena ini dapat terjadi dalam kontak antar roda gigi, kontak antar roda dengan rel kereta dll. Keausan yang terjadi pada kontak *rolling-sliding* dapat dihitung menggunakan metode eksperimen, analitik dan numerik. Metode eksperimen dapat dilakukan dengan menggunakan alat *twin disc test*, metode analitik dilakukan dengan perhitungan matematis, sedangkan metode numerik dapat dilakukan menggunakan FEM (*finite element method*) dan BEM (*boundary element method*). Dalam beberapa tahun terakhir, perhitungan keausan menggunakan metode analitik dan numerik berkembang dengan pesat. Penelitian ini akan membahas mengenai perhitungan keausan kontak *rolling-sliding* dengan metode analitik GIWM (*global incremental wear model*) dan metode numerik (FEM dan BEM) dari beberapa literatur. Metode analitik dan numerik menunjukkan hasil yang berimpit dengan perhitungan secara eksperimen. Kelebihan dari penggunaan metode analitik dan numerik adalah adanya penghematan dari segi biaya eksperimen.

Kata kunci : kontak *rolling-sliding*, keausan, perhitungan analitik, simulasi numerik

1. PENDAHULUAN

Tribologi merupakan ilmu pengetahuan dan teknologi yang membahas tentang interaksi antar permukaan dua benda atau lebih dalam gerak relatif yang meliputi gesekan (*friction*), keausan (*wear*), dan pelumasan (*lubrication*). Sejarah panjang tentang Tribologi telah disampaikan oleh Dowson [1]. Tribologi membahas beberapa jenis kontak, yaitu kontak statis, kontak *sliding* dan kontak *rolling*. Kontak statis antar dua permukaan dapat berupa titik (*point contact*) atau garis (*line contact*). Jenis kontak statis ini telah disampaikan oleh Hertz dengan sifat material elastic [2]. Pengaruh dari adanya kontak statis adalah terjadinya deformasi. Beberapa pengembangan teori kontak statis telah dilakukan juga oleh Zhao-Maietta-Chang dan Jamari-Schipper [3,4] yang membahas analisa kontak elastis-plastis secara analitik. Kogut-Etsion dan Jackson-Green [5,6], membahas kontak elastis-plastis antara permukaan bola dengan *rigid flat* menggunakan *finite element*.

Dari beberapa literatur tentang kontak statis yang telah diutarakan sebelumnya, kemudian berlanjut dengan kontak *sliding*. Kontak *sliding* adalah kontak dengan kecepatan relatif antara dua benda atau permukaan pada pusat kontak dalam bidang tangen [7]. Fenomena kontak *sliding* dapat dijumpai dalam komponen permesinan, seperti kontak *sliding* yang terjadi antara *rocker arm* dengan *camshaft*, *ring piston* dengan *cylinder liner*, dll. Pengaruh dari adanya kontak *sliding* adalah hilangnya sebagian material dari permukaan yang saling kontak *sliding* dan dinamakan keausan [8]. Kontak *sliding* telah dipelajari beberapa orang, seperti Podra [9] yang melakukan simulasi keausan akibat kontak *sliding*, dari penulis yang sama Podra dan Anderson [10] melakukan simulasi keausan pada kontak *sliding* dengan metode FEM. Molinari [11] melakukan pemodelan keausan kering pada logam menggunakan FEM.

Selanjutnya kontak *rolling* adalah kontak dengan kecepatan angular relatif antara dua benda dengan satu sumbu dalam bidang tangen [7]. Pengaruh yang terjadi jika *pure rolling* terhadap permukaan kontak adalah sama dengan kontak statis yaitu terjadi deformasi. Kontak *rolling* telah dipelajari oleh banyak orang, seperti Bhargava dkk [12,13] yang memodelkan kontak *rolling* menggunakan FEM dan Merwin dan Johnson [14] menganalisa deformasi plastis pada kontak *rolling*.

Baru-baru ini, pengembangan kontak lebih lanjut mulai membahas tentang kontak *rolling-sliding*. Kontak *rolling-sliding* adalah kontak *rolling* yang terjadi jika kecepatan kedua benda tidak sama [15]. Salah satu

pengaruh dari kontak *rolling-sliding* adalah terjadinya *slip*, sehingga mengakibatkan keausan pada permukaan yang saling kontak. Sebagai contoh, fenomena ini dapat terjadi dalam kontak antar roda gigi, kontak antar roda dengan rel kereta dll.

Dalam banyak aplikasi *engineering*, keausan merupakan sesuatu yang harus dihindari, maka untuk meminimalisir keausan diperlukan pengetahuan mengapa keausan dapat terjadi. Keausan merupakan fenomena yang sangat kompleks karena berhubungan dengan karakter dari permukaan yang ditentukan oleh *bulk chemical* dan struktur fisik serta kondisi lingkungan [16]. Keausan yang terjadi pada kontak *rolling-sliding* dapat dihitung menggunakan metode eksperimen, analitik dan numerik. Metode eksperimen dapat dilakukan menggunakan alat *twin disc test*, metode analitik dilakukan dengan perhitungan matematis, sedangkan metode numerik dapat dilakukan menggunakan FEM dan BEM.

Dalam beberapa tahun terakhir, perhitungan keausan pada kasus *rolling-sliding* menggunakan metode analitik dan numerik berkembang dengan pesat, seperti Hegadekatte dkk [17] yang mengajukan beberapa metode untuk menghitung keausan berdasarkan perhitungan matematis dan numerik berbasis FEM, kemudian disusul oleh Rodriguez-Tembleque dkk [18] yang mencoba jalan lain untuk menghitung keausan dengan metode numerik berbasis BEM. Paper ini membahas perhitungan keausan kontak *rolling-sliding* dengan metode eksperimen, metode analitik GIWM dan metode numerik (FEM dan BEM) dari beberapa literatur.

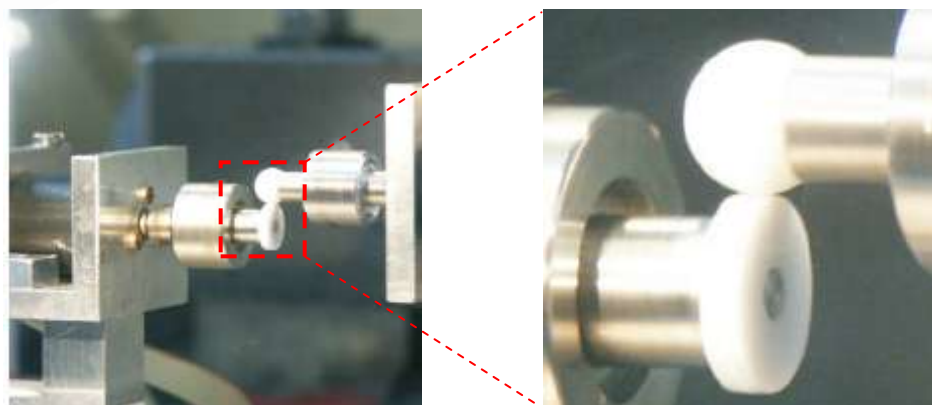
2. PERHITUNGAN KEAUSAN PADA KONTAK *ROLLING-SLIDING*

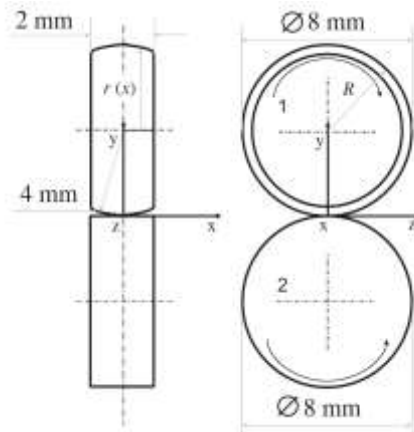
Keausan yang terjadi pada permukaan akibat kontak *rolling-sliding* penting untuk diketahui, karena berhubungan dengan umur pakai (*life-span*) dari suatu komponen permesinan. Hilangnya suatu material pada permukaan yang saling kontak dapat diketahui dengan menggunakan beberapa metode, yaitu metode eksperimen, metode analitik dan metode numerik.

2.1 Metode eksperimen

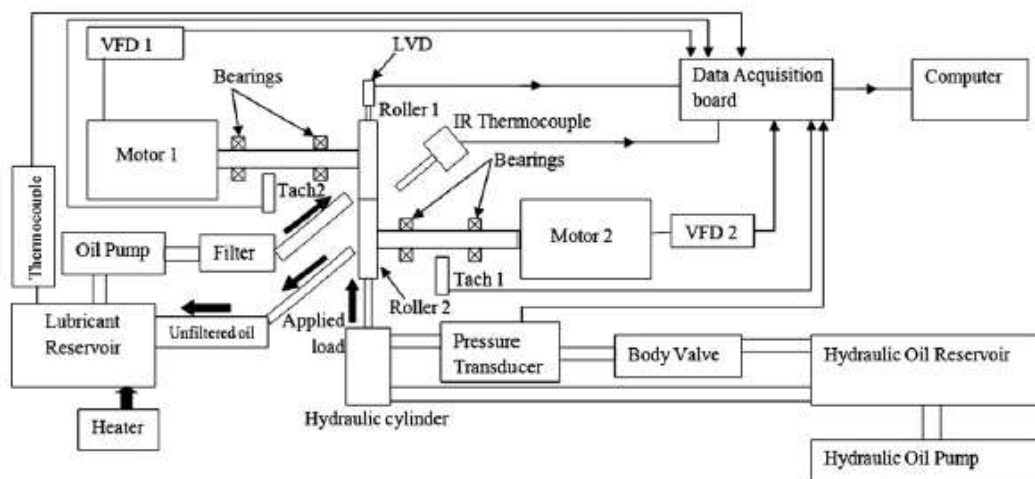
Keausan pada kontak *rolling-sliding* dapat diketahui dengan melakukan eksperimen. Hegadekatte [17] telah melakukan eksperimen *rolling-sliding* dimana alat yang digunakan untuk eksperimen adalah *Twin-disk tribometer*, seperti Gambar 1. Cara kerja alat ini adalah dengan memberikan beban pada kedua *roller* dan memutar keduanya dengan kecepatan yang berbeda. Hilangnya material pada permukaan yang saling kontak kemudian diukur setelah menempuh sejumlah rotasi. Keausan dinyatakan sebagai volume yang hilang per satuan beban dan per satuan jarak *sliding* yang disebut sebagai koefisien keausan berdimensi, k_D . Koefisien keausan berdimensi adalah parameter penting yang didapatkan dari Tribometer.

Akbarzadeh dkk [19] juga telah melakukan eksperimen yang berhubungan dengan keausan pada kontak *rolling-sliding*. Skema pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2. Cara kerjanya sama dengan eksperimen Hegadekatte, akan tetapi alat yang digunakan dilengkapi dengan beberapa sensor dan pengambilan datanya menggunakan LabVIEW. Pengujian dilakukan sebanyak tujuh kali dimana pengujian (1-5) dilakukan untuk mengetahui sifat *running-in* dan pengujian (6 & 7) dilakukan untuk menganalisa *the steady-state wear*.





Gambar 1: *Twin-disc tribometer* [20]



Gambar 2: Skema pengujian kontak *rolling-sliding* [19]

2.2 Metode Analitik

2.2.1 Model keausan Archard

Pada tahun 1953 Archard [21] mengusulkan suatu model pendekatan untuk mendeskripsikan keausan *sliding*, yang merupakan babak baru dalam perkembangan ilmu Tribologi. Archard berasumsi bahwa parameter kritis dalam keausan *sliding* adalah medan tegangan di dalam kontak dan jarak *sliding* yang relatif antara permukaan kontak. Model ini sering dikenal sebagai hukum keausan Archard (*Archard's wear law*), yang bentuk dasarnya pertama kali diperkenalkan oleh Holm [22].

Model Archard didasarkan pada pengamatan-pengamatan bersifat percobaan. Bentuk sederhana dari model keausan ini adalah:

$$V = k_D \cdot F_N \cdot s \quad (1)$$

dimana V adalah volume material yang hilang akibat keausan, s adalah jarak *sliding*, F_N adalah beban normal, H adalah kekerasan dari material yang mengalami keausan, k adalah koefisien keausan tak berdimensi yang merupakan suatu konstanta yang disediakan untuk mencocokkan perhitungan antara teori dan pengujian, k_D adalah koefisien keausan yang berdimensi yang didapat dari $k_D = k/H$.

Untuk aplikasi *engineering*, kedalaman keausan memiliki lebih banyak keuntungan, dibanding volume keausan. Maka Archard membagi kedua sisi dari persamaan (1) dengan daerah kontak yang terbentuk A [23], sehingga persamaannya menjadi

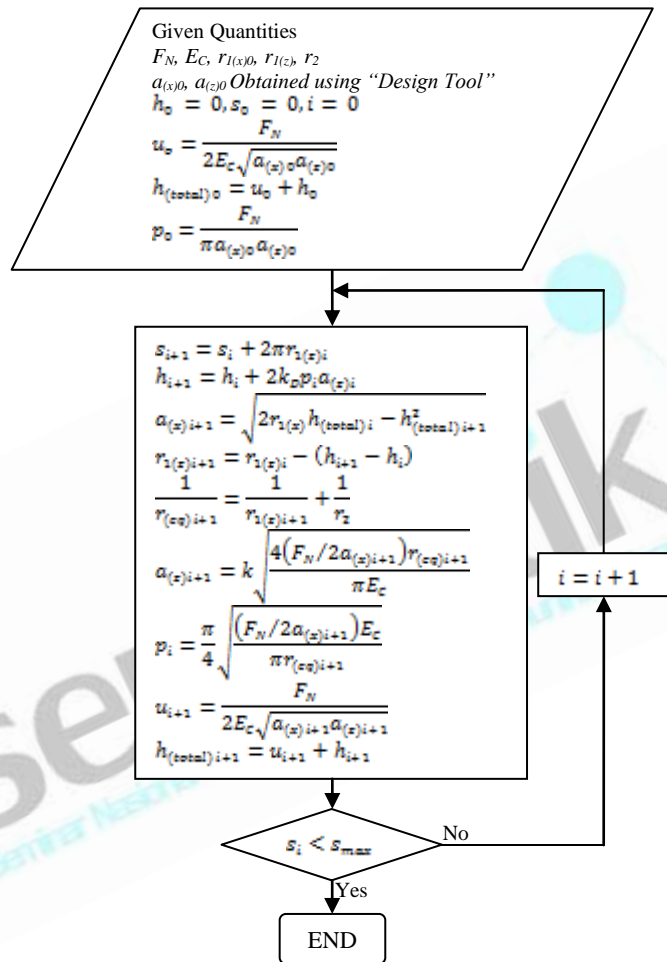
$$\frac{h^w}{s} = k_D \cdot p \quad (2)$$

dimana h^W adalah kedalaman keausan, dan p adalah tekanan kontak.

2.2.2 Model keausan Hegadekatte

Global incremental wear model (GIWM) adalah sebuah metode pendekatan nilai keausan secara analitik yang diajukan oleh Hegadekatte [17]. Istilah “*global*” digunakan untuk menunjukkan bahwa skema pemodelan keausan ini hanya mempertimbangkan jumlah secara menyeluruh (*global*), seperti tekanan kontak rata-rata dan bukan jumlah yang lebih spesifik pada suatu lokasi, misal tekanan kontak lokal.

Tekanan kontak rata-rata yang digunakan kemudian diperbaharui (*updated*) pada akhir tiap kenaikan jarak *rolling* dikarenakan semakin meluasnya bidang kontak, kemudian diistilahkan sebagai “*incremental*”. Hegadekatte menjelaskan sebuah skema pemodelan keausan secara global untuk menghitung keausan pada permukaan *rolling*, lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3: Diagram alir perhitungan keausan *rolling-sliding* [17]

2.3 Metode Numeric

Hegadekatte [17] telah membuat metode perhitungan keausan menggunakan bantuan FEM yang dinamakan Wear Processor dan UMESHMOTION. Kedua metode FEM tersebut merupakan gabungan antara analitis dengan numerik. Maksudnya adalah hasil dari pekerjaan FEM berupa *contact pressure*, p , dengan melakukan pemodelan menggunakan software ABAQUS, digunakan untuk menghitung persamaan keausan. Untuk Wear-Processor menggunakan persamaan (3) sedangkan UMESHMOTION menggunakan persamaan (4), dimana h_{i+1} adalah kedalaman keausan tiap kenaikan tingkat rotasi, k_D adalah koefisien keausan, V_1 & V_2 adalah kecepatan rotasi dari kedua silinder dimana $V_1 \neq V_2$, Δt_j adalah kenaikan tingkat (*incremental*). Kemudian Rodríguez-Tembleque [19] mengajukan perhitungan keausan dengan menggunakan *boundary element method* (BEM).

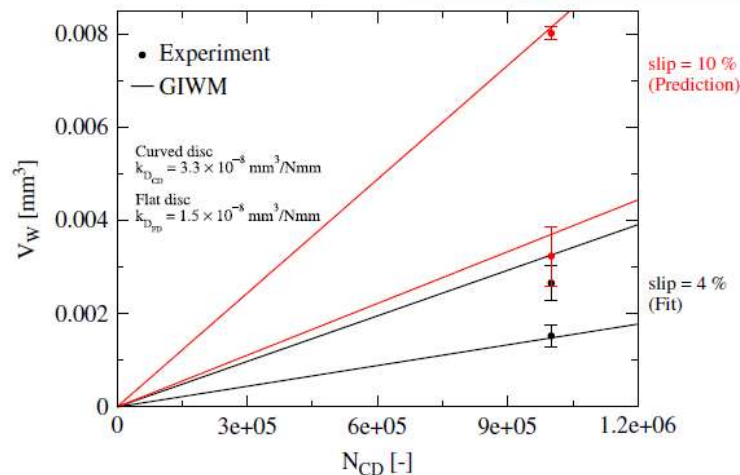
$$h_{i+1}^W = k_D p_i \Delta s_i + h_i^W \quad (3)$$

$$h_{i+1}^W = k_D \frac{\Delta t_i |v_1 - v_2|}{2\pi R} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} p r d\theta + h_i^W \quad (4)$$

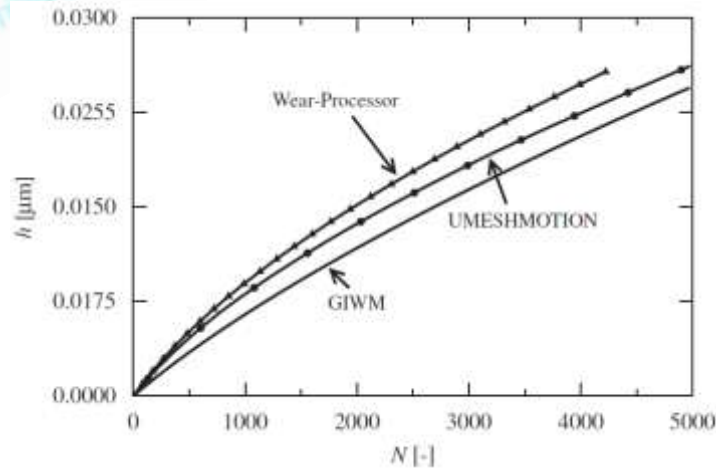
3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Hasil

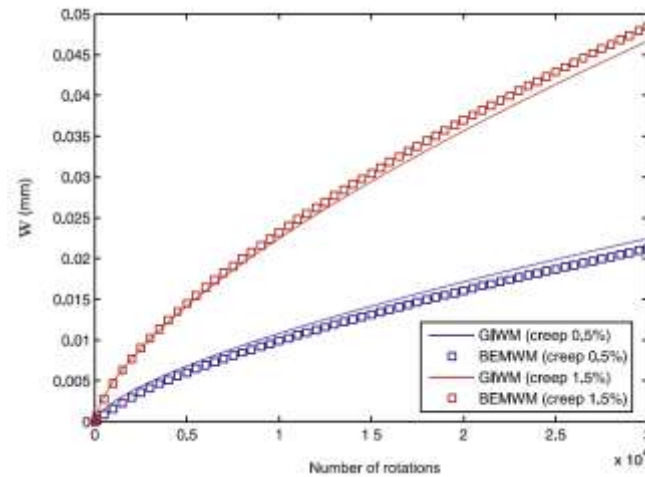
Gambar 4 menunjukkan hasil volume keausan dari permukaan *disc* sebagai fungsi dari jumlah rotasi yang ditempuh. Gambar tersebut juga merupakan perbandingan hasil keausan antara perhitungan matematis (GIWM) dengan eksperimen. Dapat dilihat perbedaan yang cukup kecil antara keduanya. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan keausan secara matematis menggunakan GIWM dapat diterima dengan baik, dan dimungkinkan untuk memprediksi keausan dengan variabel yang berbeda. Kemudian perhitungan GIWM dapat dijadikan sebagai perhitungan acuan untuk prediksi keausan dengan menggunakan metode numerik yaitu perhitungan keausan menggunakan FEM (*Wear Processor* dan *UMESHMOTION*) dan BEM. Gambar 5 dan 6 menunjukkan hasil kedalaman keausan sebagai fungsi dari jumlah rotasi yang telah ditempuh. Gambar 5 merupakan perbandingan hasil keausan antara FEM dengan GIWM, sedangkan Gambar 6 merupakan perbandingan hasil keausan antara BEM dengan GIWM. Kedua perbandingan telah menunjukkan hasil yang cukup baik.



Gambar 4: Volume keausan yang didapat dari GIWM dan Eksperimen [17]



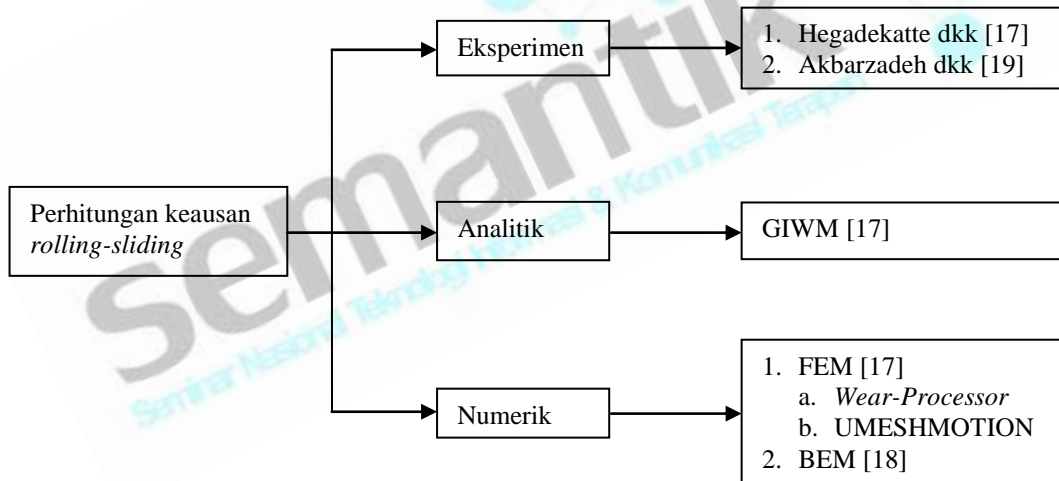
Gambar 5: Kedalaman keausan yang didapat dari GIWM, *Wear-Processor* dan *UMESHMOTION* [17]



Gambar 6: Kedalaman keausan yang didapat dari GIWM dan BEM [18]

3.2 Diskusi

Berdasarkan penelusuran pustaka yang telah dilakukan maka perhitungan keausan *rolling-sliding* dapat dilakukan dengan metode eksperimen, analitik dan numerik, lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 7. Dari skema perhitungan keausan tersebut, kemudian penulis akan mencoba mengulangi dengan metode numerik menggunakan bantuan software analisa elemen hingga ABAQUS. Hasil dari pengulangan tersebut akan dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan modifikasi pada bagian geometri kontak.



Gambar 7: Skema perhitungan keausan *rolling-sliding*.

4. PENUTUP

Kesimpulan yang dapat diangkat dalam paper ini adalah ada tiga metode yang digunakan untuk menghitung keausan pada kontak *rolling-sliding*. Pertama metode eksperimen yang dapat dilakukan menggunakan *twin disc test*, kedua metode analitik dengan perhitungan GIWM, sedangkan yang ketiga dengan metode FEM dan BEM. Metode analitik dan numerik menunjukkan hasil yang berimpit dengan perhitungan secara eksperimen. Kelebihan dari penggunaan metode analitik dan numerik adalah adanya penghematan dari segi biaya eksperimen. Penelitian ini akan dikerjakan ulang yang kemudian hasilnya akan dikembangkan lebih lanjut dengan melakukan modifikasi pada bagian geometri kontak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Dowson, , *History of Tribology*, Second edition, London: Professional Engineering Publishing, 1998.
- [2] H. Hertz, *Ueber die beruehrung fester elastischer koerper*. J Reine Angewandte Mathe; 92:156–71, 1882.
- [3] Y. Zhao, D.M. Maietta, and L.Chang, “*An asperity microcontact model incorporating the transition from elastic deformation to fully plastic flow*,” ASME-Journal of Tribology 122, pp. 86 – 93, 2000.
- [4] J. Jamari, D.J. Schipper, “*An elastic–plastic contact model of ellipsoid bodies*” Tribology Letters, Vol. 21, No. 3, 2006.
- [5] L. Kogut, and I. Etsion, “*Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat*,” ASME-Journal of Applied Mechanics vol 127, pp. 657 – 662, 2002.
- [6] R.L. Jackson, and I. Green, “*A finite element study of elasto-plastic hemispherical contact against a rigid flat*,” ASME-Journal of Tribology 127, pp. 343 – 354, 2005.
- [7] Jamari, *Running-in of Rolling Contacts*, PhD thesis, Twente University, The Netherland, 2006.
- [8] Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication, 1969, Research Group on Wear of Engineering Materials, Organisation for Economic Co-operation and Development, reprinted in Wear Control Handbook (eds M.B. Peterson and W.O. Winer), American Society of Mechanical Engineers, 1980, pp. 1143–1303.
- [9] P. Podra, *FE Wear Simulation of Sliding Contacts*, PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 1997.
- [10] P. Podra, and S. Andersson, *Simulating sliding wear with finite element method*, Tribology International, 32, pp. 71-81, 1999.
- [11] J.F. Molinari, M. Ortiz, R. Radovitzky, E.A. Repetto, *Finite element modeling of dry sliding wear in metals*. Eng Comput; 18:592–609, 2001.
- [12] V. Bhargava, G.T. Hahn, and C.A. Rubin, “*An elastic-plastic finite element model of rolling contact. Part 1: Analysis of single contacts*,” ASME-Journal of Applied Mechanics 52, pp. 67 – 74, 1985.
- [13] V. Bhargava, G.T. Hahn, and C.A. Rubin, “*An elastic-plastic finite element model of rolling contact. Part 2: Analysis of repeated contacts*,” ASME-Journal of Applied Mechanics 52, pp. 75 – 82, 1985.
- [14] J.E. Merwin, and K.L. Johnson, “*An analysis of plastic deformation in rolling contact*,” Proc. Instn. Mech. Engineers 177, pp. 676 – 685, 1963.
- [15] J.J. Kalker, *Rolling Contact Phenomena: Linear Elasticity*, Department of Applied Mathematical Analysis, Delft University of Technology, The Netherlands, 2000.
- [16] S.K. Biswas, *New Directions in Tribology*, Mechanical Engineering Publication, London, 1997.
- [17] V. Hegadekatte, S. Kurzenhauser, N. Huber, and O. Kraft, *A predictive modeling scheme for wear in tribometers*, Tribology International, 41, pp. 1020-1031, 2008.
- [18] L. Rodriguez-Tembleque, R. Abascal, M.H. Aliabadi, *A boundary element formulation for wear modeling on 3D contact and rolling-contact problems*, INT J SOLIDS STRUCT, Vol:47, Pages:2600-2612, 2010.
- [19] S. Akbarzadeh and M.M. Khonsari, *Experimental and theoretical investigation of running-in*, Department of Mechanical Engineering, Louisiana State University, USA, 2508 Patrick Taylor Hall, Baton Rouge, LA 70803, 2010.
- [20] B. Kanavalli, *Application of user defined subroutine UMESHMOTION in ABAQUS for simulating dry rolling/sliding wear*, Master Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2006.
- [21] J.F. Archard, *Contact and rubbing of flat surfaces*, Journal of Applied Physics, 24, pp. 981-988, 1953.
- [22] R. Holm, *Electric Contacts*. Almquist and Wiksells Akademiska Handböcker, Stockholm, 1946.
- [23] J.F. Archard, *Wear theory and mechanisms*. In: Peterson MB, Winer WO, editors. Wear control handbook. New York: ASME, 1980.