

FENOMENA TERMAL PADA *SLIDING CONTACTS*: SEBUAH KAJIAN PUSTAKA

M Denny Surindra

Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof. Sudarto, SH. Tembalang, Kotak Pos 6199/SMS Semarang 50329
Telp: (024) 7473417, 7466420 (Hunting), 7478384, Fax. 7472396

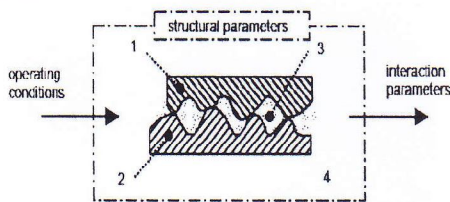
ABSTRAK

Tribology merupakan ilmu yang mempelajari kontak permukaan yang sedang melakukan gerakan relatif. Banyak proses manufaktur dan aplikasi tribosystem melibatkan gerakan sliding antara dua buah body yang menimbulkan energi panas pada daerah kontak. Paper ini mereview model-model perpindahan panas yang terbangkitkan akibat adanya deformasi plastis atau gesekan. Gesekan ini mengakibatkan pelepasan panas (*frictional heat*) pada area kontak dan dapat dimodelkan dengan suatu konsentrasi sumber panas yang ditetapkan sebagai semi-infinite. Perlu dilakukan penelitian untuk prediksi thermal pada kontak sliding dengan berbagai kondisi temperatur lingkungan yang berbeda-beda. Hal ini untuk menganalogikan suatu kontak sliding yang bekerja di sekitar ruang bakar, atau kondisi di daerah kutub. Kedua kondisi tersebut mempunyai keadaan yang ekstrim dan sangat berpengaruh terhadap karakteristik perpindahan panas dalam thermal contact.

Kata kunci: gesekan, kontak sliding, thermal contact

1. PENDAHULUAN

Tribology erat kaitannya dengan kontak permukaan yang sedang melakukan gerakan relatif. Kontak tersebut akan menghasilkan gesekan yang mengakibatkan terjadinya keausan sehingga pelumasan sangat dibutuhkan untuk mengurangi gesekan dan keausan. Skema tribosystem dapat dipresentasikan dengan dua buah *body* yang sedang kontak (1 dan 2), dengan pelumasan (3) yang berada di antara dua *body* dan sekelilingnya (4) seperti yang terlihat dalam gambar 1.



Gambar 1. Skema sebuah tribosystem [1]

Di dalam suatu tribosystem banyak elemen yang bekerja dalam kondisi operasi dan mempunyai peran yang penting, elemen tersebut adalah [1]:

- Gaya Normal F
- Kecepatan Sliding v
- Tipe Gerakan
- Waktu Kontak t atau Jarak Sliding s
- Temperatur θ

Elemen-elemen tersebut sangat berhubungan dengan struktur parameter tribosystem. Struktur parameter tribosystem ini merupakan propertis yang terkait dengan perilaku mekanis dan perilaku thermal material, struktur parameter tersebut adalah:

- Komposisi dan *Microstructure*
- Kekasaran
- Elastis Modulus
- *Hardness*
- Reaksi Permukaan

Dengan adanya kondisi operasi dan struktur parameter, di dalam tribosystem sendiri akan mengalami kejadian sebagai berikut:

- *Contact Stress*/Deformasi
- *Friction*/Gesekan
- *Heat Generation*/Panas terbangkitkan
- *Wear*/Keausan

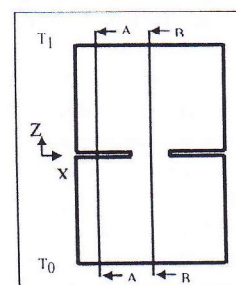
2. FENOMENA THERMAL

Banyak proses manufaktur dan aplikasi tribosystem melibatkan gerakan sliding antara dua buah *body* yang menimbulkan energi panas pada daerah kontak. Panas yang terbangkitkan tersebut akibat adanya deformasi plastis atau gesekan, misalnya panas yang terbangkitkan dalam proses pengerjaan dengan mesin (*machining*), yang berkaitan dengan deformasi plastis adalah di daerah pengikisan atau kikisan bekas gerakan sliding dari *tool* dan menghasilkan panas akibat dari gesekan pada permukaan.

Kontak tribosystem dapat dimodelkan sebagai dua buah *body* yang mengalami multi kontak dimana setiap kontak adalah kontak permukaan antara dua buah *asperity*.

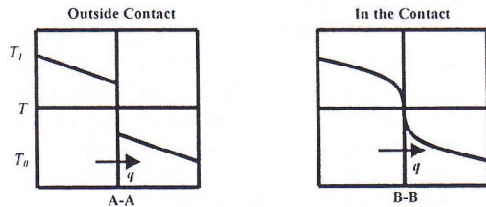
a. Kontak Stationary

Konsep pembatasan aliran panas untuk kontak tribology dapat diterangkan dengan gambar yang memperlihatkan keadaan potongan melintang yang terbuat dari batang seperti gambar 2.



Gambar 2 Cross section irisan batang [2]

Temperatur permukaan yaitu temperatur pada $z = 0$, dua bagian batang pada daerah kontak harus mempunyai temperatur yang sama pada saat kontak, tetapi tidak harus mempunyai temperatur yang sama diluar daerah kontak seperti dalam gambar 3.



Gambar 3. Distribusi temperatur melewati *interface* kontak di daerah kontak dan di luar kontak [2]

b. Kontak Bergerak: Kontak *Sliding*

Dengan menggunakan konsep Holm [3,4] temperatur permukaan dapat dibagi menjadi dua kategori: kenaikan temperatur permukaan lokal (*local surface temperature*) dan kenaikan temperatur keseluruhan (*bulk temperature*). Kenaikan temperatur lokal didefinisikan sebagai kenaikan temperatur dalam kaitannya dengan pembatasan aliran panas skala kecil selama pelepasan panas akibat gesekan (*frictional heat*) pada area kontak. Kenaikan temperatur keseluruhan didefinisikan sebagai kenaikan temperatur dalam kaitannya dengan pembatasan aliran panas skala besar pada panas akibat gesekan (*frictional heat*).

Menurut Bloks [5], suatu konsentrasi sumber panas ditetapkan sebagai *semi-infinite body* karena kenaikan temperatur permukaan pada dasarnya dibatasi untuk daerah yang sangat kecil di sekitar kontak *interface*.

Temperatur pada jarak yang jauh dari kontak *interface* jarang dipengaruhi oleh kondisi pada *interface*, temperatur pada *infinity* atau temperatur keseluruhan hanya mempengaruhi temperatur di bidang dekat kontak.

3. TEMPERATUR PERMUKAAN LOKAL

Subjek ini pembahasannya dimulai oleh Blok [5] yang merasa banyak pembahasan yang berikutnya. Kennedy [6] memberikan sebuah review literatur yang komprehensif. Kenaikan temperatur lokal dimodelkan dengan kenaikan temperatur suatu *semi-infinite solid* yang menggerakkan sumber panas. Carlaw dan Jaeger [7] mengembangkan dengan model empat persegi dipanaskan secara seragam pada *péclet number* yang tinggi.

3.1 Model Bentuk Kontak *Ellipse*

Dengan mengasumsikan panas dipancarkan pada kecepatan satu unit panas per unit waktu, dan suatu medium *semi-infinite* yang homogen bergerak seragam dengan kecepatan U dan paralel terhadap sumbu x . Menurut Carlaw dan Jaeger [7], distribusi temperatur permukaan berasumsi *steady state* dipresentasikan sebagai berikut:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi KR} \exp\left(-\frac{U}{2\kappa}(R-x)\right) \quad (1)$$

dimana K adalah konduktivitas solid dan $\kappa = K/\rho c$ adalah difusivitas.

3.2. Algoritma Numerik Discretization

Carlaw dan Jaeger [7] menemukan suatu ekspresi analitis yang mereduksi integral kompleks menjadi integral garis. Tetapi persamaan yang dibuat masih mengandung *infinite* integral, hal ini kurang cocok untuk penyelesaian proses numerik, sehingga oleh Oliver [8] diselesaikan dengan *double adaptive algorithm*. Abramowitz dan Stegun [9] melakukan pendekatan polynomial untuk eksponensial integral. Brandt dan Lubrecht [10] membangun suatu algoritma yang disebut *Multilevel Multi Integration* untuk mengevaluasi numerik secara cepat. Balsara dan Brandt [11] menyempurnakannya.

3.3 Fungsi *fits* (*Asymptotic*)

Fungsi *fits* menggunakan penyelesaian *asymptotic* dengan *péclet number* yang kecil dan *péclet number* yang besar.

Untuk *Péclet Number* Yang Kecil

Berlaku mekanisme perpindahan panas konduksi untuk kontak *elliptical*. Lebih lanjut Francis [12] memanfaatkan teori kontak *elastic* Hertz [13] untuk menyelesaikan distribusi temperatur aktual.

Untuk *Péclet Number* Yang Besar

Berlaku mekanisme perpindahan panas konveksi dan semua konduksi ke arah samping/*lateral* diabaikan. Kontak dengan bentuk apa saja dapat diperlakukan sebagai *band contact*, Jaeger [14]. Carlaw dan Jaeger [7] menyatakan panas yang ada sama dengan waktu selama panas input dirasakan yaitu jarak dari pergerakan panas awal terbagi dengan kecepatannya menuju bagian akhir yang ditentukan. Jaeger [14] menghasilkan temperatur maksimum pada pemanasan seragam kontak *band*, selain itu juga menerapkan pemanasan seragam pada kontak *elliptic*. De Winter [15] menerapkan distribusi panas *semi-ellipsoidal*.

Fungsi *Curvefit* Untuk *Intermediate Péclet Number*

Untuk nilai *péclet number intermediate*, penyelesaian *asymptotic* tidak dapat melukiskan kenaikan temperatur lokal. Pada range ini, konveksi dan konduksi bekerja sebagai mekanisme perpindahan panas. Berdasarkan hasil sumber kotak Greenwood [16] menyatakan bahwa kenaikan temperatur permukaan lokal dengan sumber berbagai bentuk dapat diestimasi dengan interpolasi dari penyelesaian *stationary*/tetap dan penyelesaian kecepatan tinggi.

4. TEMPERATUR PARTITION

Pada kenyataan kontak *tribology*, kedua *body* mempunyai konduktivitas sama dan panas yang terbentuk saat kontak akan distribusikan antara dua *body*. Kenaikan temperatur lokalnya biasa disebut *heat partition*/panas sekat antara dua *body* dengan konduktivitas yang sama saat kontak, telah diteliti secara numerik oleh Allen [17] untuk bentuk kontak *band*. Kemudian diperbaiki oleh Cameron et al. [18]. Archard [19] memperkenalkan penyelesaian pendekatan berdasarkan kerja dari Jaeger [14] yang dikenal dengan aturan *thumb* untuk problem *partition*.

4.1. Pendekatan Numerik

Lubrecht [20] telah mendemonstrasikan teknik *multigrid/meshing* untuk menyelesaikan problem *tribology*. Penyelesaian persamaannya dilakukan oleh Lubrecht dan Ioannides [21] untuk *dry* kontak. Venner dan Lubrecht [22] dilanjutkan Brandt [23] menggunakan distribusi *relaxation*.

4.2. Fungsi *fits* (*Asymptotic*)

Dua *body* bergerak *sliding* dengan konduktivitas yang sama, jika kedua *body* mempunyai *péclet number* yang sama dan bergerak dengan arah yang sama maka fungsi *partition*/sekat adalah sama. Juga untuk dua benda bergerak dengan arah yang sama dengan cara *asymptotic* nilai *péclet number* tinggi maka fungsi *partition*/sekat menjadi konstan, yang mana dapat dikalkulasi tanpa melakukan simulasi numerik.

Arah kecepatan yang sama

Dua *body* bergerak pada arah yang sama dengan *péclet number* yang tinggi, Blok [24] telah menunjukkan bahwa kecepatan *supply* panas adalah disekat antara dua benda saat kontak. *Supply* panas ke tiap benda mempunyai bentuk yang sama sebagai total *supply* panas.

Arah kecepatan yang berlawanan

Abel [25] telah membuat persamaan integral dengan batasan konstan dengan memodelkan dua benda yang identik bergerak pada kecepatan sama pada arah yang berlawanan dan *supply* panas yang seragam. Untuk lebih detailnya Bos dan Moes [26,27] telah meneliti tentang hal ini. Greenwood [28] memperlihatkan rata-rata dari suatu pembuktian analitis bahwa untuk *supply* panas seragam, kenaikan temperatur maksimum untuk *body* yang bergerak dengan kecepatan tinggi dengan arah yang berlawanan adalah sama dengan *body* yang bergerak pada kecepatan tinggi dengan arah yang sama.

Stationary Solid

Bos [2] telah membahas persamaan untuk temperatur *flash* dua *body* saat kontak dengan kecepatan nol atau dengan kata lain *body* tetap saat terjadi kontak.

4.3. General function fit

Aturan *thumb* yang dikenalkan oleh Archard [19] tanpa terkecuali apakah arah kecepatan sama atau berlawanan mempresentasikan penyelesaian eksak untuk panas *partition* pada kondisi *asymptotic*.

5. TEMPERATUR BULK

Aliran panas dapat dihitung dengan memperhatikan *body* 1 yang mempunyai temperatur *bulk* nol saat kontak dengan *body* 2 yang mempunyai *bulk* positif atau mempunyai temperatur mass, seperti yang diperkenalkan oleh Carslaw dan Jaeger [7].

Arah kecepatan sama dan berlawanan

Bos [2] telah mempresentasikan pada *interface* aliran panas sebuah sumber untuk *body* 1 dan sebuah muara untuk *body* 2, dengan arah kecepatan sama dan arah kecepatan yang berlawanan, kemudian dilengkapi oleh Elshof [29].

Dua *body* pada kondisi tidak bergerak

Solusi *asymptotic* untuk kecepatan rendah dapat diselesaikan dengan analogi dua *body* pada keadaan tidak bergerak. Situasi ini dimodelkan oleh Holm [4] yang menganalogikan dengan tahanan listrik.

Penyelesaian untuk semua kondisi

Lebih lanjut Bos [2] telah membuat penyelesaian rata-rata yang dapat digunakan untuk menyelesaikan temperatur *bulk*. Hubungan yang dibuat Bos [2] merupakan persamaan eksak yang dapat menyelesaikan untuk dua *body* pada kondisi tidak bergerak, dua *body* dengan angka *péclet number* yang tinggi ataupun *péclet number* yang berubah-ubah dan kecepatan dengan arah yang sama.

6. KESIMPULAN

Penelitian fenomena *thermal* yang telah banyak dilakukan membahas tentang kenaikan temperatur permukaan kontak untuk dua *body* yang mempunyai konduktivitas berbeda sehingga dapat dimodelkan dengan *péclet number* yang kecil, besar dan nilai tengah-tengah. Untuk pembahasan kontak *body* dengan konduktivitas yang sama dimodelkan dengan arah yang berlawanan dan arah yang sama. Penelitian yang membahas tentang kenaikan temperatur *bulk* dimodelkan dengan arah kecepatan yang berlawanan dan arah kecepatan yang sama. Dengan demikian, akan dibahas lebih lanjut prediksi *thermal contact* pada kontak *sliding* dengan berbagai kondisi temperatur lingkungan yang berbeda-beda. Hal ini untuk menganalogikan suatu kontak *sliding* yang bekerja di sekitar ruang bakar, atau kondisi di daerah kutub. Kedua kondisi tersebut mempunyai keadaan yang ekstrim dan sangat berpengaruh terhadap karakteristik perpindahan panas dalam *thermal contact*.

DAFTAR PUSTAKA

1. Van Drogen, Mark., "The transition to adhesive wear of lubricated concentrated contact", Ph.D. thesis, Twente University, Enschede, The Netherlands, 2005.

2. Bos, Johannes., "Frictional Heating of Tribological contact", Ph.D. thesis, Twente University, Enschede, The Netherlands, 1995.
3. Holm, R., "Calculation of the Temperature Development in a Contact Heated in the Contact Surface, and Application to the Problem of the Temperature in Sliding Contact", *J. of Appl. Phys.*, Vol. 19, 1948, pp. 361-366.
4. Holm, R., *Electric Contact Handbook*, Springer-Verlag, Berlin, 1958.
5. Blok, H., "Theoretical study of temperature rise at surface of actual contact under oiliness lubricating conditions", *Instn. Mech Engrs., Proceedings of general discussion on lubricating and lubricants*, Vol. 2, 1937 pp. 222-235.
6. Kennedy, F.E., "Thermal and thermomechanical effects in dry sliding", *Wear*, Vol. 100, 1984, pp. 453-467.
7. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., "Conduction of Heat in Solid", Oxford University Press, Oxford, UK, 1959.
8. Oliver, J., "A doubly-adaptive Clenshaw-Curtis quadrature method," *Computer Journal*, Vol. 15, 1972, pp. 141-147.
9. Abramowitz, M. and Stegun, I.A. (eds), *Handbook of Mathematical Functions*, New York, 1965.
10. Brandt, A. and Lubrecht, A.A., "m Multilevel Matrix Multiplication nad Fast Solution of Integral Equations," *J. of Comp. Physics*, Vol. 90, No. 2, 1990, pp. 348-370.
11. Balsara, S. and Brandt, A., "Multilevel Methods for Fast Solution of N-body and Hybrid Systems", *Int. Series of Num. Math.*, Birkhäuser Verlag, Vol. 98, 1991, pp 131-142, Basel.
12. Francis, H.A., "Interfacial temperature Distribution Within a Sliding Hertzian Contact," *ASLE Trans.*, Vol. 14, 1971, pp. 41-54.
13. Hertz, H., "Über die Berührung fester elastischer Körper," *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, Vol. 92, 1881, pp. 156-171.
14. Jaeger, J.C., "Moving sources of heat", *J. and Proc. Roy. Soc. N.S.W.*, Vol. 76, 1943, pp. 203-224.
15. Winter, A. de, "De berekening van de flitstemperatuurdelingen in en aan weersziden van een bandvormig contactvlak (tevens warmtebron) tussen twee over elkaar glijdende loopvlakken", Master Thesis (in Dutch), Technical University of Delft, 1967.
16. Greenwood, J.A., "An Interpolation Formula for Flash Temperatures," *Wear*, Vol. 150, 1991, pp. 153-158.
17. Allen, d.n. de G., "A suggested approach to finite-difference representation of differential equations, with an application to determine temperature distribution near a sliding contact", *Quart. J. Mech. And Applied Math.*, Vol. 15, 1962, pp. 11-33.
18. Cameron, A., Gordon, A.N., and Symm, G.T., "Contact temperatures in sliding/rolling surfaces". *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 286, 1965, pp. 45-61.
19. Archard, J.F., "The temperature of rubbing surface", *Wear*, Vol. 2, 1959, pp. 438-455.
20. Lubrecht, A.A., ten Napel, W.E. and Bosma, R., "Multigrid, an alternative method for calculating film thickness and pressure profiles in elastohydrodynamically lubricated line contact". *ASME J. of Tribology*, Vol. 108, 1986, 551-556.
21. Lubrecht, A.A., and Ioannides, E., "A fast solution of the dry contact problem and the associated sub-surface stress field", using multilevel techniques, *ASME J. of Tribology*, Vol. 113, 1989, pp. 128-133.
22. Venner, C.H. and Lubrecht, A.A., "Multilevel solves for Integro and integro-differential problems in contact mechanics and lubrication". *Proceedings 4th European Multigrid Conference*, Amsterdam, The Netherlands, 1993, pp. 11-127. Editors Hemker, P.W. and Wesseling, P. published by Birkhauser Verlag.
23. Brandt, A., "Multigrid Techniques: 1984 Guide with applications to fluid dynamics," available as G>M>D>-studeien No. 85, from G>M>D.-FIT, Postfach 1240, D-5205, St. Augustin1, Germany, 1984.
24. Blok, H., "The surface under extreme pressure lubricating conditions", *Contributions by the Delft laboratory of the Royal Dutch/Shell to the 2nd World Petroleum Congress*, Paris 1937, the Hague 1939, 1937, pp. 151-182.
25. Abel, N.H., "Solutions de quelques problèmes à l'aide d'intégrales définies," *Oeuvres*, I 11, 97, 1823.
26. Bos, J., and Moes, H., "Frictional heating of tribological contacts," *ASME J. of Tribology*, Vol. 117, 1995, pp. 171-177.
27. Bos, J., and Moes, H., "Frictional heating of elliptic contact," *Dissipative processes in tribology*, Proc. 20th Leed-Lyon Symposium on Tribology, Elsevier, Amsterdam, 1994, pp. 491-500.
28. Greenwood, J.A., "Flash temperatures for bodies moving at equal, high, speeds in opposite direction.", *ASME J. of Tribology*, 1995.
29. Elshof, H.L.J., "Heat Fluxes between semi-infinite solids", Masters Thesis, University of Twente, Enschede, 1994.