

# Analisis pengaruh perbedaan koefisien gesekan statis dan kinetis terhadap gerakan *stick-slip* menggunakan bahan viskoelastis

Zahrul Fuadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Sarjana Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala  
Jl. Tgk Syech Abdurrauf No. 7 Darussalam Banda Aceh Telp. 0651-7552222  
Email korespondensi: zahrul.fuadi@unsyiah.ac.id

## Abstrak

Gerakan *stick-slip* pada suatu sistem mekanik dapat menyebabkan kerugian seperti getaran yang berlebihan yang dapat menyebabkan hilangnya presisi ataupun aus yang berlebihan. Gerakan *stick-slip* dipengaruhi oleh berbagai parameter antara lain adalah perbedaan antara nilai koefisien gesekan statis dan kinetis,  $\mu_s-\mu_k$ . Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi dan uji gesekan untuk melihat pengaruh parameter  $\mu_s-\mu_k$  terhadap gerakan *stick-slip*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh parameter  $\mu_s-\mu_k$  secara kualitatif terhadap terjadinya gerakan *stick-slip*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa amplitudo gerakan *stick-slip* dipengaruhi oleh besarnya nilai  $\mu_s-\mu_k$ . Semakin besar nilai  $\mu_s-\mu_k$  maka semakin besar amplitudo gerakan *stick-slip* yang terjadi.

**Kata kunci:** koefisien gesekan statis, koefisien gesekan kinetis, *stick-slip*, material viskoelastis

## Abstract

Stick-slip motion in a mechanical system is undesirable because it has negative effects on the performances such as positioning errors and excessive wear. Stick-slip motion is caused by various parameters such as the difference between static and kinetic coefficient of friction,  $\mu_s-\mu_k$ . In this study, the effect of the difference between static and kinetic coefficient of friction,  $\mu_s-\mu_k$ , on stick-slip occurrence is numerically simulated and experimentally tested using a mass-slider system. The objective is to find out the effect of  $\mu_s-\mu_k$  parameter on the stick-slip propensity, qualitatively, using viscoelastic material. The results indicated that the amplitude of the stick-slip motion increased significantly with the increased value of  $\mu_s-\mu_k$  parameter.

**Keywords:** coefficient of static friction, coefficient of kinetic friction, stick-slip, viscoelastic material

## 1. Pendahuluan

Gesekan adalah suatu fenomena yang terjadi pada suatu permukaan kontak yang bergerak relatif satu sama lain. Pada komponen mekanis, gesekan terjadi pada sistem transmisi, bantalan, katup, rem, dan roda. Secara umum, gesekan dapat dinyatakan sebagai gaya reaksi yang dihasilkan oleh permukaan yang berkontak dimana ia tergantung kepada geometri dan kekasaran permukaan kontak, sifat fisik dan mekanik dari bahan, perpindahan dan kecepatan relatif serta ada atau tidaknya bahan pelumas pada permukaan tersebut.

Gerakan *stick-slip* adalah fenomena yang terjadi akibat interaksi yang kompleks antara dua permukaan akibat adanya gesekan [1]. Gerakan *stick-slip* pada suatu sistem mekanik dapat menyebabkan kerugian seperti getaran yang berlebihan yang dapat menyebabkan hilangnya presisi. Dalam aplikasi, gerakan *stick-slip* dapat dibagi kedalam dua kelompok, yaitu *stick-slip* frekwensi tinggi dan *slick-slip* frekwensi rendah. *Stick-slip* frekwensi tinggi antara lain adalah bunyi decit pada sistem rem sedangkan *stick-slip* frekwensi rendah antara lain adalah chatter pada mata tool mesin potong yang dapat menyebabkan hilangnya presisi atau aus berlebihan.

Permasalahan utama yang dihadapi dalam mengatasi gerakan *stick-slip* adalah bagaimana membuat suatu model matematis yang realistik, yaitu yang dapat merepresentasikan gesekan ke dalam model sebaik mungkin. Oleh sebab itu, terdapat bermacam-macam model matematis *stick-slip* dalam literature, diantaranya model Coulomb [2], model *sprag-slip* [3], model *pin-on-disk* [4], dan model *spring-mass* [5]. Masing-masing model memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri. Walaupun demikian, belum ada satu model universal yang dapat mencakup seluruh aspek gesekan dalam satu model tertentu.

Dari keseluruhan model yang ada, model yang paling tepat digunakan untuk masalah gerakan *stick-slip* frekwensi rendah adalah model Coulomb. Model ini digunakan antara lain dalam pemodelan persoalan frekwensi rendah getaran creep groan pada sistem pengereman [6, 7]. Pada model ini, factor utama yang menyebabkan terjadinya gerakan *stick-slip* adalah selisih antara besaran koefisien gesekan statis dan kinetis,  $\mu_s-\mu_k$ .

Dalam makalah ini, suatu pemodelan dengan menggunakan teori gesekan Coulomb digunakan untuk mensimulasikan gerakan *stick-slip* pada suatu sistem massa-peluncur (*mass-slider*). Simulasi dilakukan

dengan menggunakan program matematika sederhana dengan visualisasi menggunakan program Ms. Excel. Disamping simulasi, juga dilakukan uji experiment menggunakan sistem massa-peluncur, dimana besaran parameter  $\mu_s-\mu_k$  divariasikan dengan cara merubah kekasaran permukaan peluncur. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh parameter  $\mu_s-\mu_k$  terhadap terjadinya gerakan stick-slip frekwensi rendah. Selain daripada itu, penelitian ini juga menunjukkan bahwa besaran parameter  $\mu_s-\mu_k$  dapat dipengaruhi oleh kekasaran permukaan. Dalam penelitian ini, digunakan bahan viskoelastik untuk mendapatkan interaksi permukaan yang sepenuhnya elastis.

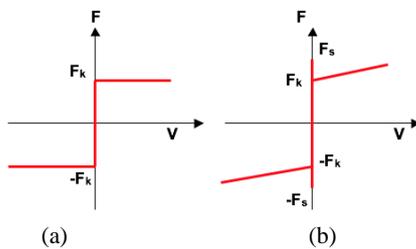
2. Metode

Model Coulomb Gerakan Stick-slip

Gesekan Coulomb dapat dituliskan dengan persamaan:

$$F = F_k \operatorname{sgn}(v) \tag{1}$$

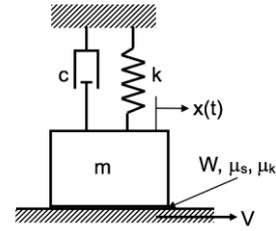
dimana gaya gesekan  $F$  berbanding lurus dengan gaya normal  $F_k$ , yaitu  $F_k = \mu N$ . Gaya gesekan berlawanan dengan arah gerakan dan tidak dipengaruhi oleh kecepatan serta luas permukaan kontak. Teori gesekan Coulomb tidak memberikan secara spesifik besaran gaya gesek pada kecepatan nol. Gaya gesek dapat memiliki nilai diantara  $-F_k$  dan  $+F_k$  tergantung bagaimana nilai fungsi sign didefinisikan (Gambar 1 (a)). Gesekan Coulomb biasanya dikombinasikan dengan gesekan viskos (Gambar 1 (b))



Gambar 1. Model gesekan Coulomb (a) dan model gesekan Coulomb dikombinasikan dengan gesekan viskos (b)

Model gesekan tersebut dipakai untuk mensimulasikan gerakan stick-slip pada sistem satu derajat kebebasan seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Massa sistem tersebut berkontak dengan lantai yang bergerak dengan kecepatan  $V$ . Persamaan gerakan dari sistem tersebut adalah:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \tag{2}$$



Gambar 2. Sistem satu derajat kebebasan dengan gesekan

dimana  $m$ ,  $c$ , dan  $k$  masing-masing adalah massa, redaman, dan kekakuan serta tanda  $(\dot{\cdot})$  menunjukkan tanda derivatif terhadap waktu  $t$ .

Menurut model viskos Coulomb pada Gambar 1(b), sistem satu derajat kebebasan diatas akan mengalami keadaan stick dan keadaan slip mengikuti kecepatan relatif antara bodi massa dan lantai, yaitu:

$$F = \begin{cases} F_s, & \text{bila } V - \dot{x} = 0 : \text{Keadaan stick I} \\ F_k, & \text{bila } V - \dot{x} < 0 : \text{Keadaan slip I} \\ -F_k, & \text{bila } V - \dot{x} > 0 : \text{Keadaan slip II} \end{cases} \tag{3}$$

Gaya gesekan statis  $F_s$  terjadi pada interval

$$-\mu_s W = -F_{smax} \leq F_s \leq F_{smax} = \mu_s W \tag{4}$$

dimana  $F_{smax}$  adalah gaya gesekan statis maksimum,  $\mu_s$  adalah koefisien gesekan statis, dan  $W$  adalah gaya normal. Pergerakan dinamis sistem ditentukan oleh gaya gesekan kinetik  $F_k$ , yaitu:

$$F_k = \mu_k \cdot W \tag{5}$$

dimana  $\mu_k$  adalah koefisien gesekan kinetik,  $\mu_k > \mu_s$ , dan keduanya bernilai konstan.

Kondisi stick dan slip dapat digambarkan lebih jelas dengan menggunakan persamaan gerakan yang memiliki beberapa parameter tak berdimensi [6], yaitu:

(a) keadaan stick

$$\xi' = 1 \tag{6}$$

$$-(1 + 2\gamma)\lambda - 2\zeta = \xi_{min} \leq \xi \leq \xi_{max} = \lambda - 2\lambda \tag{7}$$

(b) keadaan slip I

$$\xi' < 1 \tag{8}$$

$$\xi'' + 2\zeta\xi' + \xi = -2\zeta\lambda \tag{9}$$

(c) keadaan slip II

$$\xi' > 1 \tag{10}$$

$$\xi'' + 2\zeta\xi' + \xi = -2\zeta\lambda \tag{11}$$

dimana  $\gamma$ ,  $\lambda$ , dan  $\zeta$  adalah parameter tak berdimensi sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{\mu_k}{\mu_s - \mu_k} \tag{12}$$

$$\lambda = \frac{(\mu_s - \mu_k)W}{v\sqrt{mk}} \quad (13)$$

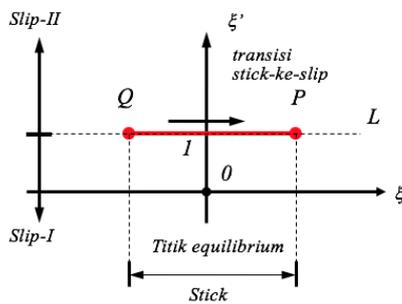
$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (14)$$

dan parameter tak berdimensi waktu  $\tau$  dan posisi  $\xi$ :

$$\tau = \omega_n t \quad (15)$$

$$\xi = \frac{\omega_n}{v} \tilde{x} \quad (16)$$

Keadaan *stick*, *slip I*, dan *slip II* diilustrasikan pada Gambar 3 dimana  $Q$  adalah posisi awal *stick* menurut  $\xi_{min}$  pada Pers. 10 serta kecepatan awal tak berdimensi  $\xi' = 1$ . *Slip* berawal dari titik  $P$  dan keadaan dinamik sistem ditentukan oleh nilai  $\xi'$ . Gerakan *stick* dan *slip* yang biasa dimulai pada posisi *stick* lalu diikuti dengan gerakan *slip I* secara bergantian tanpa melibatkan gerakan *slip II*.



Gambar 3. Bidang dimensionless yang menunjukkan tiga tahapan keadaan gesekan [8].

### Uji Stick-slip

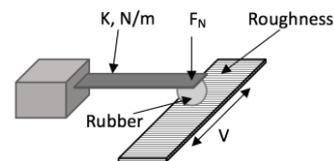
Perbedaan nilai koefisien gesekan statis dan kinetik dipengaruhi banyak faktor antara lain sifat bahan dan faktor permukaan. Dalam penelitian ini, dilakukan uji *stick-slip* dengan menggunakan suatu sistem massa-peluncur untuk melihat pengaruh nilai  $\mu_s - \mu_k$  terhadap amplitudo gerakan *stick-slip* yang terjadi. Sistem massa-peluncur ditunjukkan pada Gambar 4. Sistem ini terdiri dari beberapa bagian yaitu pegas dalam arah normal, motor peluncur, dan permukaan kontak.

Untuk melihat pengaruh nilai  $\mu_s - \mu_k$  terhadap amplitudo gerakan *stick-slip*, diperlukan spesimen uji yang memiliki nilai  $\mu_s - \mu_k$  yang berbeda. Untuk itu perlu digunakan material yang dapat dilakukan perlakuan sehingga permukaannya memiliki nilai  $\mu_s - \mu_k$  tertentu. Bahan yang cocok untuk itu adalah bahan viskoelastis, dalam hal ini digunakan bahan silikon. Selanjutnya, untuk memperoleh nilai  $\mu_s - \mu_k$  tertentu pada dua permukaan spesimen yang berbeda, perlu dilakukan perlakuan permukaan, yaitu dengan mengubah kekasaran permukaannya. Kekasaran permukaan adalah salah satu faktor yang dapat mempengaruhi nilai  $\mu_s - \mu_k$  [7].

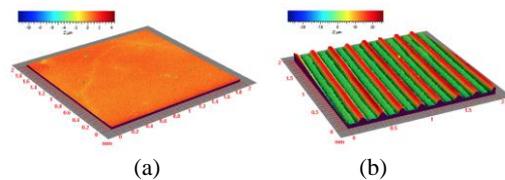
Gambar 5 menunjukkan dua macam spesimen yang dipakai pada saat pengujian yang memiliki kekasaran permukaan yang berbeda, yaitu *smooth* (Gambar 5(a)

dan *grooved* (Gambar 5(b)). Kedua spesimen tersebut dibuat dengan menuangkan silikon cair diatas permukaan logam yang memiliki kekasaran permukaan yang berbeda. Setelah mengeras, spesimen silikon memiliki permukaan seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Kontak permukaan pada sistem terjadi antara material silikon dan bahan karet (Gambar 4). Sebelum dilakukan pengujian, permukaan dibersihkan dengan alkohol untuk menghilangkan debu dan benda-benda halus lainnya. Sinyal getaran diperoleh dengan menggunakan *accelerometer* dalam arah normal terhadap arah luncuran.



Gambar 4. Sistem massa peluncur untuk model satu derajat kebebasan.



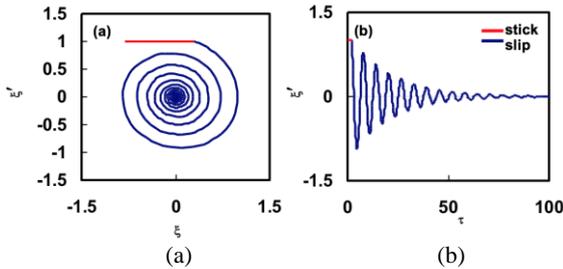
Gambar 5. Permukaan peluncur; smooth (a) dan grooved (b)

### 3. Hasil dan Pembahasan

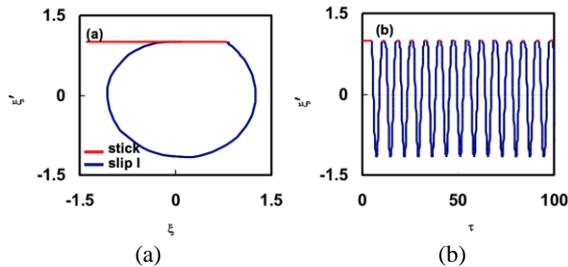
Pers. 6 dan Pers. 8 menunjukkan bahwa keadaan *stick* dan *slip* dipengaruhi oleh parameter  $\gamma$  dan  $\lambda$  yang keduanya ditentukan oleh parameter  $\mu_s - \mu_k$ . Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan hasil simulasi yang pengaruh parameter  $\gamma$  dan  $\lambda$  terhadap gerakan *stick-slip*. Gambar 6(a) mengilustrasikan bahwa keadaan *stick* dimulai pada titik  $Q$ ,  $\xi = \xi_{min} = -0.8$ , kemudian berganti menjadi *slip* pada titik  $P$ ,  $\xi = \xi_{max} = 0.3$ , dan kecepatan  $\xi' = 1$ . Akibat redaman, gerakan *slip* menjadi teredam sehingga kecepatan tidak mampu lagi mencapai nilai 1. Keadaan ini dinamakan gerakan stabil (*stable sliding*), dimana kecepatan menuju nol (Gambar 6(b)). Gerakan stabil ini terjadi pada nilai-nilai  $\zeta = 0.1$ ,  $\gamma = 0.1$ , dan  $\lambda = 0.5$ .

Namun demikian, apabila nilai parameter  $\xi'$  kembali mencapai nilai 1, *slip* akan kembali terjadi pada  $\xi = \xi_{max} = 0.8$  (Gambar 7(a)). Keadaan *stick* dan *slip* akan terjadi secara silih berganti diakibatkan kecepatan yang selalu akan mencapai nilai 1 (Gambar 7(b)). Keadaan *stick* dan *slip* ini terjadi pada saat nilai  $\lambda$  menjadi 1 sedangkan nilai  $\zeta$  dan  $\gamma$  tetap sama.

Dari hasil diatas, terlihat bahwa gerakan *stick-slip* sangat dipengaruhi oleh parameter  $\mu_s-\mu_k$ , dimana parameter tersebut mempengaruhi besarnya nilai  $\lambda$  dan  $\gamma$ . Pada Gambar 6, keadaan gerakan stabil terjadi pada parameter  $\gamma=0.1$  dan  $\lambda=0.5$ . Keadaan berubah menjadi *stick-slip* pada kondisi nilai  $\lambda$  meningkat menjadi 1 (Gambar 7). Dalam hal ini, meningkatnya nilai  $\lambda$  disimulasikan akibat bertambahnya nilai  $\mu_s-\mu_k$ , sebagaimana ditunjukkan oleh Pers. 12. Secara jelas terlihat disini bahwa parameter  $\mu_s-\mu_k$  secara proporsional berpengaruh terhadap terjadinya gerakan *stick-slip*.



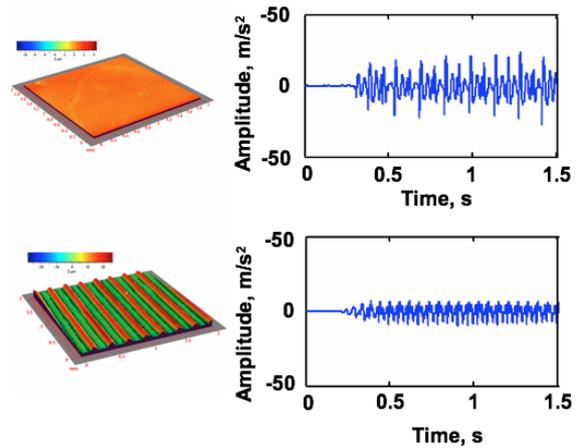
**Gambar 6.** Hasil simulasi keadaan stick yang menghasilkan gerakan stabil;  $\zeta = 0.1$ ,  $\gamma = 0.1$ ,  $\lambda = 0.5$



**Gambar 7.** Hasil simulasi keadaan stick-slip;  $\zeta = 0.1$ ,  $\gamma = 0.1$ ,  $\lambda = 1$

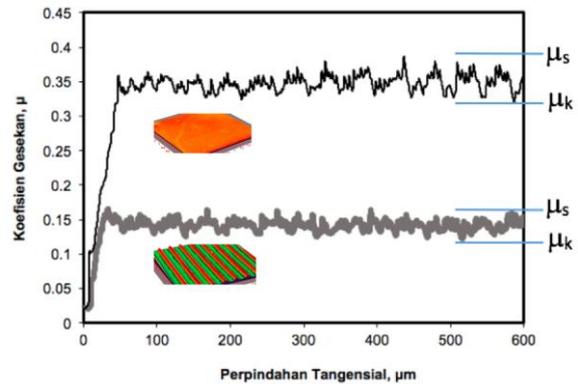
Walaupun demikian, dalam keadaan yang sebenarnya parameter  $\lambda$  dipengaruhi oleh berbagai parameter lainnya, seperti ditunjukkan oleh Pers. 12, sehingga meningkatnya nilai  $\lambda$  dapat juga disebabkan oleh bertambahnya nilai parameter-parameter tersebut baik secara individual maupun kombinasi diantara kesemuanya.

Gambar 8 menunjukkan hasil uji *stick-slip* yang dilakukan menggunakan sistem pada Gambar 4 dan spesimen uji pada Gambar 5. Dalam hal ini, perubahan parameter  $\mu_s-\mu_k$  disebabkan oleh perbedaan pada kekasaran permukaan. Gambar 9 menunjukkan bahwa nilai parameter  $\mu_s-\mu_k$  dari permukaan spesimen *smooth* relatif lebih besar daripada nilai parameter  $\mu_s-\mu_k$  dari permukaan spesimen *grooved*. Perbedaan nilai  $\mu_s-\mu_k$  dari dari dua permukaan yang berbeda disebabkan oleh tingginya gaya gesekan tangensial yang dimiliki oleh permukaan dengan kekasaran permukaan yang kecil (permukaan lebih halus) (Gambar 9). Secara teoretis, ini dapat diakibatkan oleh besarnya nilai kekakuan kontak dari kontak dua permukaan dengan kekasaran permukaan yang lebih halus [9].



**Gambar 8.** Hasil uji *stick-slip* menggunakan sistem pada Gambar 4 dan material viskoelastis dengan kekasaran permukaan yang berbeda.

Gambar 8 menunjukkan bahwa amplitudo gerakan *stick-slip* pada pengujian dengan menggunakan permukaan yang *smooth* secara signifikan lebih tinggi daripada amplitudo gerakan *stick-slip* pada material dengan kekasaran permukaan yang lebih kasar.



**Gambar 9.** Hasil uji *stick-slip* menggunakan sistem pada Gambar 4 dan material viskoelastis dengan kekasaran permukaan yang berbeda.

Hasil dari uji yang dilakukan juga menunjukkan bahwa untuk mengurangi kemungkinan terjadinya gerakan *stick-slip* pada suatu permukaan, maka permukaan tersebut perlu memiliki permukaan yang kekasaran yang relatif lebih kasar.

Disini, pembahasan hanya dilakukan secara kualitatif. Adapun hubungan kuantitatif antara kekasaran permukaan dengan amplitudo serta frekwensi gerakan *stick-slip* akan dibahas pada makalah selanjutnya.

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan pengujian yang dilakukan pada penelitian ini dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut: (a) hasil simulasi menunjukkan bahwa parameter perbedaan koefisien gesekan statis dan kinetis,  $\mu_s-\mu_k$ , berpengaruh secara signifikan terhadap gerakan *stick-slip*, (b) hasil pengujian menunjukkan

bahwa amplitudo gerakan *stick-slip* dipengaruhi oleh besarnya nilai  $\mu_s-\mu_k$ . Semakin besar nilai  $\mu_s-\mu_k$  maka semakin besar amplitudo gerakan *stick-slip* yang terjadi (c), nilai  $\mu_s-\mu_k$  dari suatu permukaan berhubungan dengan kekasaran permukaan tersebut. Nilai kekasaran yang lebih besar dapat mengurangi nilai parameter  $\mu_s-\mu_k$  sehingga amplitudo gerakan *stick-slip* dapat dikurangi dengan menambah kekasaran suatu permukaan.

#### Daftar Pustaka

- [1] K. Popp, *Some model problems showing stick-slip motion and chaos, friction-induced vibration, chatter, squeal and chaos*, (Ibrahim R. A. and Soom, A. ed), ASME, (1992) 1-12.
- [2] V.L Popov. *Contact Mechanics and Friction.*, Springer (2010), pp. 133-154
- [3] R. T. Spur, *A theory of brake squeal*, IMechE., Auto Div. Proc., 1 (1961/62) 33-40
- [4] W. W. Twordzydlo, E. E. Becker, J. T. Oden, *Numerical modeling of friction-induced vibration and dynamic instabilities, friction-induced vibration, chatter, squeal and chaos*, (Ibrahim R. A. and Soom, A. ed), ASME, (1992) 87-97.
- [5] T. Hamabe, I. Yamazaki, K. Yamada, H. Matsui, and S. Nakagawa. *Study of a method for reducing brake squeal*, SAE paper, (1999) 99-01-3404.
- [6] J. Brecht and K. Schiffer, *Influence of friction law on brake creep groan*, SAE paper, (2001) 2001-01-3138.
- [7] Z. Fuadi, K. Adachi, H. Adachi, K. Kato. *Experimental model for creep groan analysis*. Lubrication Science, 21 (1), (2009) pp. 27-40
- [8] K. Nakano, S. Maegawa. *Stick-slip in sliding with tangential contact compliance*. Tribology International, 42 (11-12) (2009), pp. 1771-1780
- [9] HA. Syerif, SS. Kossa. *Relationship between normal and tangential contact stiffness of nominally flat surfaces*. Wear 151 (1991), pp. 49-62.