

M7-017 Analisis Teoritik Pengaruh Kekasaran Permukaan Kontak Terhadap Munculnya Suara Lengkingan pada Rem Kendaraan

Meifal Rusli¹, Masaaki Okuma², dan Lovely Son¹

¹ Laboratorium Dinamika Struktur, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas

Email : meifal@ft.unand.ac.id

² Structural Dynamics and Design Laboratory, Mechanical and Aerospace Engineering Department, Tokyo Institute of Technology-Japan

ABSTRAK

Gesekan yang terjadi pada dua permukaan struktur seringkali menimbulkan suara lengkingan (squeal noise) dengan tekanan dan intensitas yang cukup tinggi. Salah satu kasus yang paling banyak ditemukan adalah suara lengkingan pada rem kendaraan Berdasarkan kondisi permukaan kontak, beberapa peneliti menemukan bahwa kekasaran permukaan gesek mempengaruhi munculnya suara lengkingan Ukuran "platou" pada permukaan rem memberikan pengaruh yang besar terhadap terjadinya suara lengkingan. Walaupun demikian, suara lengkingan tidak selalu terjadi pada semua kasus. Mengapa hal itu terjadi belum dapat dijelaskan dengan baik.

Pada artikel ini dibahas pengaruh parameter kontak terhadap munculnya suara lengkingan, seperti kekasaran permukaan dan gaya kontak yang dipresentasikan ke dalam kekakuan kontak permukaan gesek. Topografi permukaan disederhanakan dalam bentuk setengah bola dengan jari-jari yang sama dan ketinggian berbeda dan terdistribusi berdasarkan distribusi Gaussian. Dengan menambahkan Kekakuan kontak dan koefisien gesek pada matrik kekakuan struktur, mengakibatkan matriks kekakuan menjadi tidak simetri yang pada kondisi tertentu akan membentuk eigenvalue kompleks dengan modus getar terkopel pada modus-modus yang berdekatan. Melalui hasil analisis numerik ini dapat ditunjukkan bahwa, ketidaksabilan ini terjadi akibat adanya interaksi antara parameter permukaan kontak dengan struktur rem (piringan dan pad). Suara lengkingan hanya akan terjadi pada kondisi kontak dan koefisien gesek tertentu yang keduanya saling berinteraksi. Semakin tinggi harga koefisien gesek akan mempertinggi kemungkinan terjadinya suara lengkingan. Disamping itu, ditemukan juga bahwa struktur mempunyai sensitifitas terhadap beban gesek.

Keywords: koefisien gesek, kekakuan kontak, modus terkopel

1. Pendahuluan

Suara lengkingan (squeal noise) ditemukan berasal dari getaran tak stabil struktur yang disebabkan oleh beban gesekan. Getaran yang dibangkitkan berhubungan dengan satu atau beberapa frekuensi pribadi struktur. Dua system yang suara lengkingan ini banyak ditemukan adalah rem kendaraan dan roda kendaraan rel yang bergerak pada lintasan berbelok [1-2]. Ada beberapa mekanisme penyebab munculnya suara lengkingan ini. Ibrahim [1] dan Kinkaid [2] mencatat setidaknya ada empat mekanisme yang berkembang dari banyak literatur, yaitu *stick-slip*, *sprag-slip*, redaman negatif, dan modus terkopel. Terbukti secara teoritis *stick-slip*, *sprag-slip*, redaman negatif dapat menyebabkan ketidakstabilan dan *chaos* pada sistem, tetapi tidak dapat menjelaskan semua fenomena terjadinya suara lengkingan.

Lebih jauh Chen, dkk [3] melaporkan bahwa bahwa *stick-slip* terjadi pada kecepatan relatif kedua permukaan gesek rendah, dan tidak terjadi pada kecepatan relatif yang tinggi. Chen dkk [4] juga menemukan bahwa tidak ada hubungan antara redaman negatif dengan terjadinya suara lengkingan pada sistem dengan gerak gesekan bolak balik. Suara lengkingan bisa terjadi pada baik redaman negatif maupun positif. Selain itu, belakangan ditemukan bahwa modus terkopel menjadi mekanisme terpenting dalam analisis suara lengkingan akibat gesekan [5].

Berdasarkan topografi permukaan kontak dengan menggunakan analisis eksperimental, beberapa peneliti menemukan bahwa kekasaran permukaan yang bergesekan mempengaruhi kemunculan suara lengkingan. Erikson dkk [6] and Bergmann dkk [7] meneliti hubungan antara topografi permukaan rem dengan terjadinya suara lengkingan. Mereka menemukan bahwa tekanan kontak dari permukaan yang bergesekan dan ukuran plato mempunyai pengaruh yang sangat besar terhadap munculnya suara lengkingan. pad dengan plato yang lebih kecil cenderung membangkitkan suara lengkingan yang kuat dibanding dengan pad dengan ukuran plato lebih besar.

Lebih jauh Chen dkk [8] telah menginvestigasi hubungan antara suara lengkingan dan karakteristik permukaan goresan pada gerakan gesekan bolak balik. Mereka menemukan bahwa bahwa suara lengkingan muncul dan hilang pada keadaan goresan tertentu selama gesekan. Chen, dkk [3] menemukan bahwa dua frekuensi berbeda muncul pada suara lengkingan dengan koefisien gesek dan kekasaran permukaan yang berbeda.

Lebih jauh penulis dkk [9-10] telah menemukan bahwa parameter kontak seperti koefisien gesek dan kekakuan kontak berinteraksi dengan kekakuan struktur secara keseluruhan membentuk modus terkopel yang tidak stabil pada kondisi-kondisi tertentu. Contoh kasus yang diterapkan saat itu adalah rangka sederhana berbentuk L dengan gesekan pada salah satu ujungnya.

Pada artikel ini, penulis mencoba membahas pengaruh topografi pada permukaan bagian yang bergesekan terhadap terjadinya suara lengkingan pada rem cakram. Analisis teoritik ini diilhami dari hasil riset yang dilakukan oleh Erikson dkk [6] dan Bergman dkk [7] yang menyatakan suara lengkingan secara eksperimental terjadi hanya pada kondisi permukaan tertentu. Dan juga dari penelitian yang penulis lakukan sendiri beberapa waktu yang lalu [9-10].

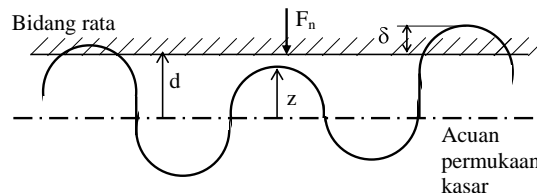
Artikel ini adalah bagian awal dari beberapa tahap penelitian yang sedang berjalan saat ini. Rem cakram dimodelkan dengan system pegas-massa empat derajat kebebasan berdasarkan model minimal yang

diusulkan oleh Hoffman dkk [11] dan Popp dkk [12] dengan tujuan untuk menyederhanakan sistem dan memudahkan mengamati pengaruh kekasaran permukaan kontak terhadap munculnya suara lengkingan tersebut. Sedangkan Topografi permukaan disederhanakan dalam bentuk setengah bola dengan jari-jari yang sama dan ketinggian berbeda dan terdistribusi berdasarkan distribusi *Gaussian*.

2. Model kontak permukaan kasar

Ketika dua benda yang secara makroskopik rata berkontak maka secara mikro kontak terjadi antara ribuan asperity yang ada pada kedua permukaan kontak dengan berbagai bentuk, ukuran dan tinggi. Sejumlah pendekatan modern telah dilakukan untuk memodelkan permukaan kontak ini secara lebih detail dan presisi selama tiga dasawarsa. Akan tetapi masih menemukan kesulitan sampai saat ini.

Sebuah pendekatan klasik berdasarkan kombinasi elastis dan plastis pada permukaan kasar dikembangkan pertama kali oleh Greenwood and Williamson (G&W model) [13,14]. Dalam pemodelan ini permukaan disumsikan terbangun dari banyak asperiti yang berbentuk setengah bola dengan radius yang sama dan variasi tinggi terdistribusi dengan distribusi Gaussian pada permukaan rata. Model statistik ini sangat terbatas karena menggunakan asumsi yang terlalu banyak dan mengabaikan banyak kenyataan-kenyataan yang terjadi pada permukaan kontak. Akan tetapi, G&W model dapat menggambarkan kecenderungan pengaruh sifat-sifat permukaan pada daerah permukaan kontak sebenarnya. Bentuk kontak sederhana ini dapat diamati pada gambar 1. [15]



Gambar 1. Model asperiti berkontak dengan permukaan rata

2.1 Kekakuan kontak normal

Kekakuan kontak teoritik berdasarkan G&W model ini telah diturunkan berdasarkan beberapa teori dan artikel yang berkembang [10]. Secara ringkas besar beban normal dan Kekakuan kontak arah normal secara sederhana didapatkan dengan persamaan berikut

$$k_n = 2\eta AE' \beta^{1/2} \sigma^{1/2} \int_D \left(\frac{z}{D} \right)^{3/2} p^* ds \quad (1)$$

Sedangkan total gaya normal yang bekerja adalah

$$W = \frac{4}{3} \eta AE' \beta^{1/2} \sigma^{3/2} \int_D \left(\frac{z}{D} \right)^{3/2} p^* ds \quad (2)$$

Dimana η adalah kerapatan asperiti per unit luas, A adalah luas permukaan kontak, E modulus elastisitas, β radius asperiti rata-rata, dan σ standar deviasi dari distribusi tinggi asperiti. Menurut Bhushan [15], untuk distribusi Gaussian dari tinggi asperity didapat D menjadi

$$D = 1.4 \left[\frac{0.57}{Pa} \right]^{0.65} \quad (3)$$

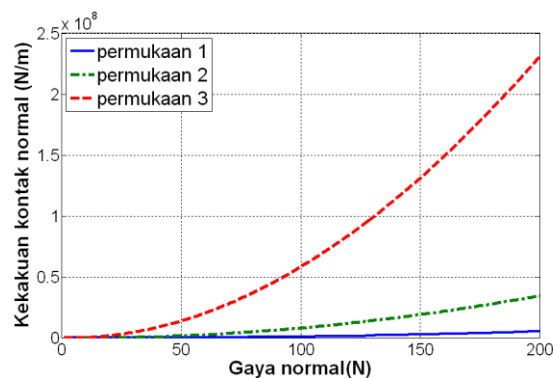
dimana

$$P_a = \frac{P_a}{\left(\frac{\beta \sigma}{E'} \right) \left(\frac{r}{\beta} \right)^{1/2}} \leq 0.57 \quad (4)$$

dan

$$p^* = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{s^2}{2}\right) \quad (5)$$

Sebagai contoh, hasil simulasi numerik ditampilkan untuk contoh kasus dengan karakteristik topografi seperti pada tabel 1. Permukaan 1 merupakan permukaan paling kasar dan permukaan 3 adalah permukaan paling halus diantara ketiga permukaan. Luas permukaan kontak diasumsikan 10^{-4} m^2 . Pada gambar 2 diperlihatkan bahwa permukaan yang paling halus dengan gaya normal yang sama mempunyai kekakuan kontak yang lebih besar dibanding permukaan yang lain.



Gambar 2 Kekakuan kontak normal dengan berbagai variasi topografi permukaan kontak

2.2 Kekakuan kontak tangensial

Untuk analisis dinamik sebuah struktur dengan kontak gesekan, dua pendekatan seringkali digunakan, yaitu *makro-slip* dan *micro-slip*. Pemodelan *makro-slip* diterapkan untuk analisis dengan asumsi permukaan gesekan gesekan dimodelkan sebagai permukaan kaku, sehingga kontak permukaan seluruhnya dalam keadaan *stick* atau *slip*. Di sisi lain, pemodelan *micro-slip* menggunakan sifat elastis dari kedua permukaan kontak. Sehingga model ini memungkinkan terjadinya slip secara parsial. Selama *micro-slip*, *sliding* terjadi hanya terjadi pada beberapa bagian permukaan kontak, sedangkan bagian yang lain tidak mengalami gerak relatif. Dengan demikian sebagian gaya gesek juga berasal dari deformasi elastis sebagian permukaan gesek, dan juga dapat didefinisikan adanya kekakuan arah tangensial permukaan kontak gesekan.

Namun, sejauh ini belum ada pemodelan yang berlaku umum untuk masalah ini. Banyak penelitian mengenai kekakuan kontak arah tangensial dilakukan dengan asumsi dan kondisi batas yang tidak bisa berlaku umum untuk banyak kasus. Sehingga dalam banyak analisis, kekakuan tangensial ini dikategorikan sebagai bagian penyumbang koefisien gesek dari permukaan gesek.

2.3. Koefisien gesek

Ahli fisika dan rekayasa telah mengembangkan berbagai teori mengenai koefisien gesek yang kemudian dikonfirmasi dengan hasil eksperimen dari sisi pandang skala nano, maupaun skala makro. Akan tetapi penyatuan teori gesekan dari semua skala masih belum ditemukan. Gaya gesek pada sebuah permukaan tergantung kepada banyak variable, seperti sifat-sifat material, geometri, dan keadaan lingkungannya. Mekanisme dari gaya gesek diwakili oleh dua komponen besar, yaitu komponen mekanik dan komponen kimia. Tidak ada formula yang bias menggabungkan semua komponen tersebut [16].

Secara umum, koefisien gesek μ untuk gesekan kering dapat diformulasikan sebagai penjumlahan dari komponen adhesi μ_a , komponen deformasi μ_d , dan komponen *ratchet* μ_r .

Table 1. Empat jenis topografi permukaan sebagai contoh simulasi

Parameter	Permukaan 1	Permukaan n 2	Permukaan 3	Peluncur
max. radius, R_p (μm)	1.6	0.80	0.2	0.2
mean spacing, S_m (μm)	150	80	50	50
standart deviation, σ (μm)	0.75	0.35	0.1	0.1
asperity density, η (cm^{-2})	5000	15000	36000	36000
modulus elasticity, E (Nm^{-2})	2.11×10^{11}	2.11×10^{11}	2.11×10^{11}	2.11×10^{11}
poisson's ratio, ν	0.3	0.3	0.3	0.3

Komponen deformasi didefinisikan sebagai jumlah deformasi asperiti μ_{ds} dan komponen deformasi partikel lain yang terdapat pada permukaan μ_{dp} [17]. Secara sederhana diformulasikan dalam bentuk

$$\mu = \mu_a + \mu_{ds} + \mu_{dp} + \mu_r \cdot \quad (6)$$

Investigasi eksperimental [18] memperlihatkan bahwa korelasi antara gesekan dan adhesi tergantung kepada beberapa parameter seperti temperatur, kecepatan relatif, beban, kelambaban relatif dengan tingkat kompleksitas yang rumit. Sehingga sulit untuk memodelkan hubungan ini. Sebagai contoh Eriksson dkk [19] meneliti hubungan koefisien gesek pada rem terhadap beberapa variabel seperti variasi tekanan, kecepatan, kekasaran permukaan. Mereka menyimpulkan bahwa sangat sulit untuk memodelkan gesekan pada rem kendaraan karena tingkat kompleksitas. Mereka menemukan koefisien gesek pada rem bervariasi antara 0.3 dan 0.6. Dalam artikel ini, koefisien gesek akan divariasikan dari 0 – 1, pada semua jenis kekasaran permukaan.

3. Model sederhana rem cakram

Sebuah model rem cakram ditampilkan pada gambar 3. Komponen utama pada rem cakram ini adalah piringan, dan kaliper yang terpasang padanya pad dan hidrolis. Untuk melihat fenomena pengaruh kekasaran permukaan terhadap bunyi lengkingan pada rem, mekanisme modus terkopel digunakan dalam analisis ketidak stabilan kedua elemen. Metode ini dikembangkan untuk menjelaskan kasus getaran tak stabil akibat gesekan. Pada metode ini dijelaskan bahwa akibat gesekan beberapa pasang modus getar yang berdekatan bergabung menjadi modus getar kompleks yang tidak stabil pada keadaan tertentu. Dengan metode ini dapat dijelaskan dengan baik mekanisme terjadinya suara lengkingan ini, dan hubungannya dengan koefisien gesek, kekakuan kontak dan kekasaran permukaan [9-12]

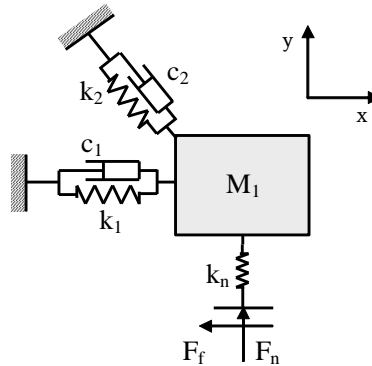


Gambar 3. Model rem cakram

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Untuk memudahkan analisis, rem dimodelkan hanya dalam beberapa derajat kebebasan. Dalam hal ini rem cakram dibagi atas 2 bagian yaitu, pad dan piringan. Untuk memperlihatkan fenomena ketidakstabilan yang bisa muncul dari pad dan piringan, kedua elemen ini masing-masing dimodelkan dalam 2 derajat kebebasan. Pad dimodelkan dengan 2 derajat kebebasan sebagai model minimal terjadinya modus terkopel yang diadopsi dari model yang dikembangkan oleh Hoffman dkk [11], seperti yang terlihat pada gambar 4. Sedangkan piringan dimodelkan dengan menggunakan model sederhana dari Popp dkk [12].

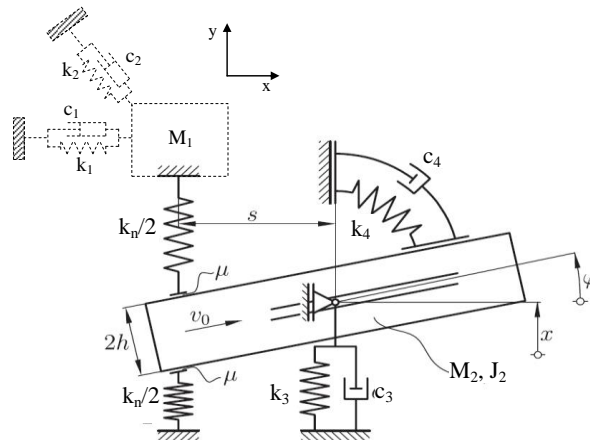


Gambar 4. Model sederhana dua derajat kebebasan untuk pad [11]

Untuk model pad, sebuah partikel dengan massa M_1 ditahan oleh dua buah pegas elastis k_1 dan k_2 serta peredam c_1 dan c_2 yang bergerak pada bidang horizontal. Kontak antara partikel dan bidang yang bergerak adalah k_n dan k_t . Jika gaya gesek dilambangkan dengan $F_f = \mu k_n y$, dan redaman diabaikan maka persamaan gerak partikel dalam bentuk matriks dapat ditulis menjadi

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + \frac{1}{2}k_2 + k_t & -\frac{1}{2}k_2 + \mu k_n \\ -\frac{1}{2}k_2 & \frac{1}{2}k_2 + k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

Sedangkan untuk piringan, model mempunyai dua derajat kebebasan, masing-masing arah translasi vertikal dan arah rotasi, seperti yang terlihat pada gambar 5. kekakuan kontak dengan pad dilambangkan dengan k_n terletak sejauh s dari pusat piringan. Persamaan gerak piringan dapat disusun dalam bentuk matriks menjadi



Gambar 5. Model sederhana dua derajat kebebasan untuk piringan [12]

$$\begin{bmatrix} M_2 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_3 + k_n & k_n s \\ -k_n & k_4 + k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Jika kedua struktur digabungkan, dimana kontak antara kedua struktur dimodelkan oleh kekakuan normal kontak dan gesekan, maka persamaan gerak kedua struktur dengan empat derajat kebebasan dapat ditulis dalam bentuk matriks berikut.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{\phi}_4 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + 0.5k_2 & -0.5k_2 + \mu k_n & 0 & 0 \\ -0.5k_2 & 0.5k_2 + k_n & -k_n & k_n s \\ 0 & -k_n & k_n + k_3 & -k_n s \\ 0 & k_n s & -k_n & k_4 + k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \phi_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Dalam analisis numerik pada artikel ini, semua parameter yang terdapat dalam persamaan gerak pada persamaan 6, 7, dan 8 diasumsikan dalam satu unit satuan. Dalam hal ini besar M_1 , M_2 , J_2 adalah 1 satuan, dan k_1 , k_2 , k_3 , dan k_4 sama dengan 1 satuan. Sedangkan harga kekakuan normal kontak divariasikan sampai dengan 5 satuan. Dengan kata lain, kekasaran permukaan kontak dan gaya normalnya membentuk kekakuan normal kontak sebesar sampai 5 kali kekakuan elemen struktur.

Dengan menggunakan jawab homogen dari persamaan gerak seperti yang terdapat pada persamaan 6,7, dan 8, maka jawab modal pada masing-masing modus dapat ditulis dalam bentuk berikut

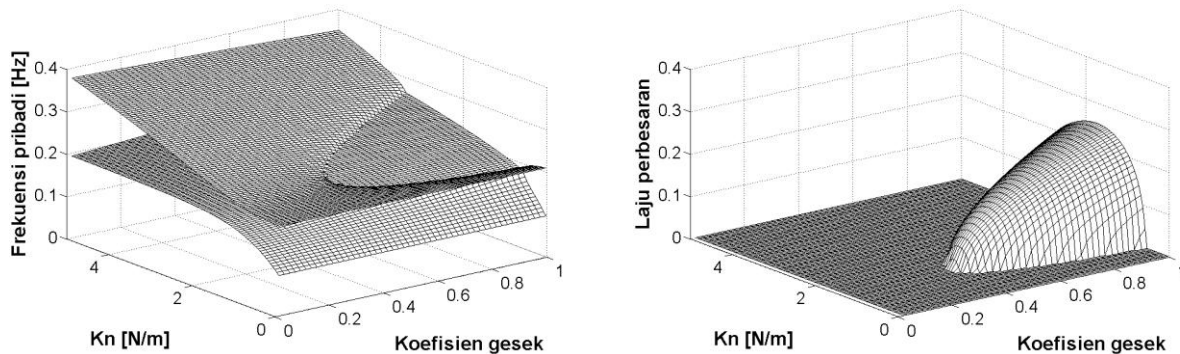
$$q_i = Q_i e^{(a+bj)t} \quad (10)$$

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

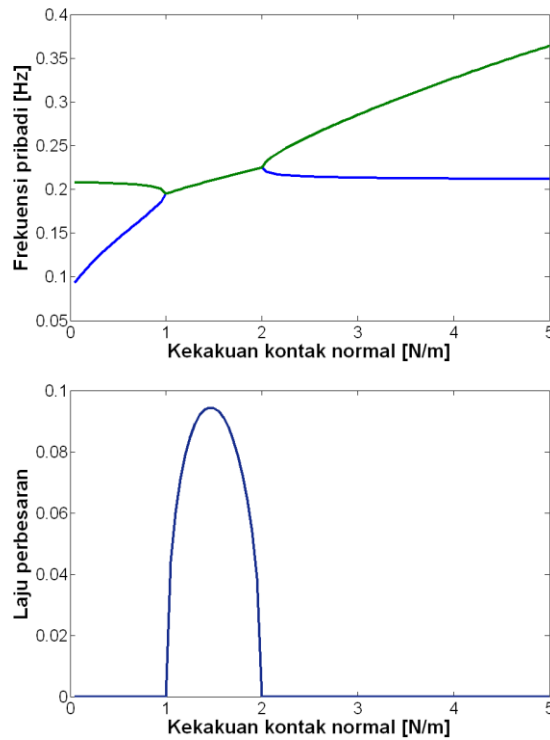
Dimana i menunjukkan modulus ke i , a adalah laju perbesaran respon dan b adalah frekuensi pribadi. Jika laju perbesaran a bernilai positif, berarti struktur bergetar semakin membesar secara eksponensial terhadap waktu, dalam arti getaran dengan tidak stabil. Jika a bernilai negatif, maka respon tereduksi secara eksponensial terhadap waktu, dengan arti getaran mengalami redaman. Jika a bernilai nol, sistem bergetar stabil tanpa redaman.

Jika analisis dinamik masing-masing elemen pad dan piringan dianalisis terpisah, maka frekuensi pribadi dan laju perbesaran respon dapat diamati pada gambar 6-9. Pada gambar 6 diperlihatkan dua frekuensi pribadi pad sebagai fungsi dari koefisien gesek dan kekakuan kontak normal. Dua lapisan permukaan memperlihatkan dua derajat kebebasan dengan dua frekuensi pribadi dan dua modulus getar. Pada harga koefisien gesek dan kekakuan kontak normal tertentu dua modulus dengan dua frekuensi pribadi bergabung menjadi satu frekuensi dan satu modulus getar. Pada daerah ini, laju perbesaran respon menjadi positif. Untuk daerah ini sistem (pad) bergetar tidak stabil dan mengeluarkan suara lengkingan.



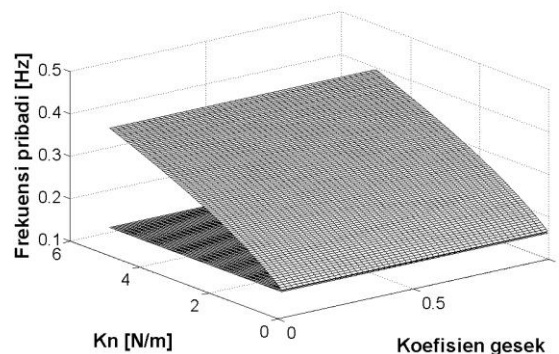
Gambar 6. Frekuensi pribadi (atas) dan laju perbesaran (bawah) dari elemen pad

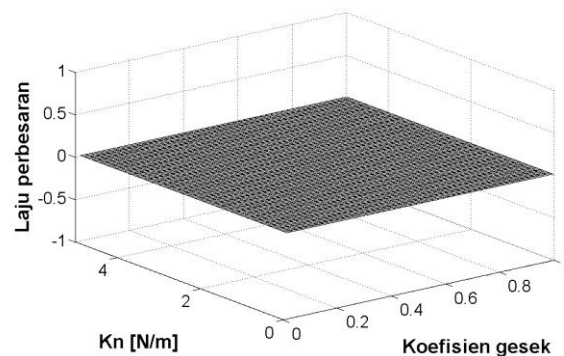
Untuk lebih detil, pada gambar 7 ditampilkan frekuensi pribadi dan laju perbesaran sebagai fungsi dari kekakuan kontak normal pada koefisien gesek 0.5. Dua modulus getar bergabung menjadi satu membentuk modulus terkopel yang tak stabil dengan laju perbesaran respon positif. Modus terkopel tak stabil ini terbentuk pada kekakuan kontak normal 1-2 satuan N/m. Dengan demikian, getaran menjadi tak stabil jika kekasaran permukaan dan gaya normal membentuk kekakuan kontak arah normal 1-2 kali kekakuan elemen struktur. Dalam hal ini, suara lengkingan muncul akibat getaran tak stabil ini. Sedangkan untuk kekakuan selain dalam rentang nilai tersebut, sistem tidak menghasilkan suara lengkingan.



Gambar 7. Frekuensi pribadi (atas) dan laju perbesaran (bawah) dari elemen pad dengan koefisien gesek 0.5

Untuk kasus piringan, dua frekuensi pribadi terpisah dengan baik, tanpa membentuk daerah dimana kedua frekuensi ini bergabung menjadi satu, seperti ditunjukkan gambar 8. Artinya, untuk kekakuan kontak normal antara 1-5 N/m piringan dalam keadaan stabil dan tidak menghasilkan suara lengkingan akibat beban gesekan. Dari kedua analisis ini dapat diketahui bahwa pad lebih sensitif terhadap gesekan untuk mnghasilkan suara gesekan.





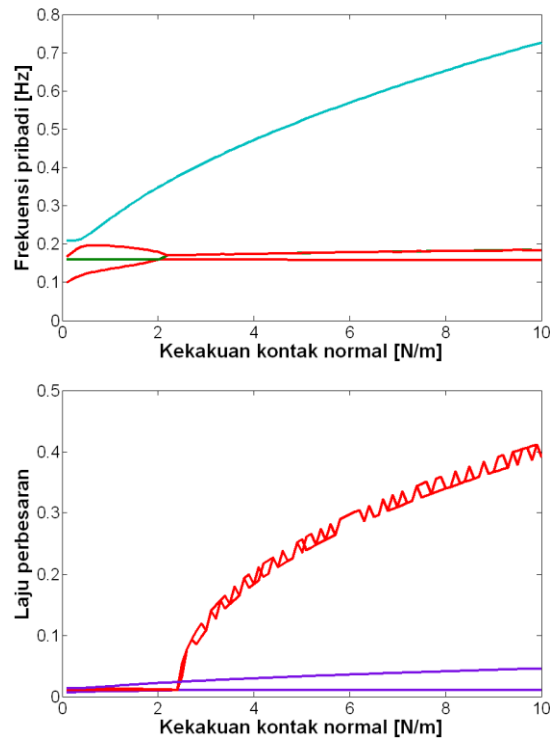
Gambar 8. Frekuensi pribadi (atas) dan laju perbesaran (bawah) dari elemen piringan

Analisis lebih lanjut dilakukan dengan menggabungkan kedua elemen pad dan piringan. Frekuensi pribadi sebagai fungsi kekakuan kontak normal dengan koefisien gesek 0.5 ditunjukkan oleh gambar 9. Dari gambar tersebut terlihat empat buah garis untuk menggambarkan 4 frekuensi pribadi. Beberapa frekuensi pribadi diantaranya semakin tinggi dengan semakin tinggi kekakuan kontak. Pada kekakuan kontak 2.1 N/m atau lebih, dua modus yang dimiliki pad bergabung menjadi satu modus. Ketidakstabilan terjadi pada kekakuan kontak normal lebih tinggi dibandingkan pada kasus analisis dengan pad terpisah. Akan tetapi ketidakstabilan ini terjadi pada kekakuan kontak normal lebih tinggi. Hal ini berarti bahwa pad menjadi tidak stabil pada kekakuan kontak normal di atas 2 kali kekakuan struktur.

Jika dihubungkan dengan kekasaran permukaan pada rem, dengan meningkatnya keausan, permukaan rem menjadi lebih halus, sehingga pada tekanan yang sama kekakuan kontak menjadi lebih tinggi. Dengan kekakuan kontak normal lebih tinggi, struktur menjadi lebih sensitif terhadap gesekan dan suara lengkingan lebih berpotensi terjadi. Kenyataan ini seringkali ditemukan di lapangan. Permukaan pad yang telah aus lebih sering menimbulkan suara lengkingan, walaupun keadaan ini tidak selalu terjadi.

Selain itu permukaan kontak, kekakuan struktur juga memegang peranan penting sebagai penyebab terjadinya suara lengkingan. Beberapa model rem, lebih sering menghasilkan suara lengkingan dibanding model rem yang lain. Semakin kaku struktur, maka sensitifitasnya menjadi menurun dalam arti rem akan menghasilkan suara lengkingan pada kekakuan kontak normal lebih tinggi.

Disamping itu, partikel lain yang berada di kedua permukaan kontak, baik padat maupun cair juga mempengaruhi kekakuan permukaan kontak dan mempengaruhi potensi munculnya suara lengkingan selama proses pengereman. Walaupun pengaruh factor tersebut belum dapat dijelaskan secara detail



Gambar 9. Frekuensi pribadi (atas) dan laju perbesaran (bawah) dari elemen gabungan pada koefisien gesek 0.5

4. Kesimpulan

Telah diperlihatkan pada penjelasan sebelumnya bahwa parameter kontak, yaitu kekakuan kontak dan koefisien gesek memegang peranan penting dalam membangkitkan modus terkopel tak stabil pada struktur dengan beban gesek. Kekakuan kontak dipengaruhi oleh topografi permukaan dan gaya normal. Semakin halus permukaan, maka kekakuan kontak semakin besar.

Modus terkopel terjadi pada rentang koefisien gesek dan kekakuan normal kontak tertentu, yang berbeda untuk masing-masing struktur. Sehingga suatu elemen dengan beban gesek menghasilkan suara lengkingan dengan karakteristik kekasaran permukaan tertentu dan tidak mengeluarkan suara jika kekasaran permukaannya berubah, atau sebaliknya.

Hal yang sama terjadi pada rem cakram. Rem tidak mengeluarkan suara ketika beroperasi pada kekasaran permukaan pad tertentu misalnya pada kondisi baru, tetapi berpotensi mengeluarkan suara lengkingan jika permukaan geseknya berubah. Semakin tinggi koefisien gesek menyebabkan semakin tingginya potensi munculnya suara lengkingan. Keausan pada pad dan piringan menyebabkan semakin meningkatnya kekakuan kontak, dan mempertinggi kemungkinan munculnya suara lengkingan. Hal inilah salah satu penyebab mengapa suara lengkingan pada rem muncul ketika lapisan pada pad sudah mulai mengalami keausan.

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

Lebih lanjut dijelaskan bahwa ketidakstabilan pad yang membentuk modus terkopel tak stabil menyumbang potensi yang lebih besar untuk membangkitkan suara lengkingan pada rem dibandingkan piringan. Untuk mencegah munculnya suara lengkingan ini, analisis lebih lanjut perilaku dinamik pad perlu dilakukan.

Daftar Pustaka

- [1] RA. Ibrahim, Friction-induced vibration, chatter, squeal, and chaos - Part II: Dynamics and modeling, *ASME Applied Mechanic Review* 47 (1994) 227-253
- [2] Kinkaid, N.M., O'Reilly, O.M. and Papadopoulos, P., *Review automotive disc brake squeal*, *Journal of Sound And Vibration*, Vol. 267, (2003,)pp. 105-166
- [3] G.X Chen, Z.R Zhou, Experimental observation of the initiation process of friction-induced vibration under reciprocating sliding condition, *Wear* 259(2005) 277-281
- [4] G.X Chen. Z.R Zhou, P. Kapsa, L. Vincent, Experimental investigation into squeal under reciprocating sliding, *Tribology International* 36 (2003) 961-971
- [5] N. Hoffman, L. Gaul, Effect of damping on mode-coupling instability in friction induced oscillations, *ZAMM Z. Angew. Math. Mech.* 83 (2003) No. 8, 524-534
- [6] M. Eriksson, F. Bergman, S. Jacobson, Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing condition, *Wear* 232 (1999) 163-167
- [7] F. Bergman, M. Eriksson, S. Jacobson, Influence of disc topography on the generation of brake squeal, *Wear* 225-229 (1999) 621-628
- [8] G.X. Chen, Z.R Zhou, P. Kapsa, L. Vincent, Effect of surface topography on formation squeal under reciprocating sliding, *Wear* 253 (2002) 411-423
- [9] Rusli, M., Okuma, M., *Effect of Surface Topography on Mode-Coupling Model of Dry Contact Sliding Systems*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol 308, 2007, pp 721-734
- [10] Rusli, M., Okuma, M., 2008, *Squeal Noise Prediction in Dry Contact Sliding Systems by Means of Experimental Spatial Matrix Identification*, *Journal of System Design and Dynamics*, Vol. 2, No. 3, 2008,
- [11] Hoffman,N., Fischer, M., Allgaier, R. , Gaul, L., 2002, *A minimal model for studying properties of the mode-coupling type instability in friction induced oscillation*, *Mechanics Research Communication*, Vol. 29, pp.197-205.
- [12] K. Popp, M. Rudolph, M. Kroger, M. Lindner, Mechanisms to generate and to avoid friction induced vibrations, *VDI-Bericht*, Vol. 1736, 2002.
- [13] A. Greenwood, J.P.B Williamson, Contact of nominally flat surfaces, *Proc. Roy. Society London*, A.316 (1970) 97-121
- [14] J.A Greenwood, J.H Tripp, The elastic contact of rough spheres, *Journal of Applied Mechanics* 1967 153-159
- [15] B. Bhushan, Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact, *Tribology Letter* 4 (1998) 1-35
- [16] M.T Bengisu, A.Akay, Relation of dry friction to surface roughness, *Transaction of The ASME Journal of Tribology* 119 (1997) 18-24
- [17] M. Nosonovsky, B. Bhushan, Scale effect in dry friction during multiple asperity contact, *Transaction of The ASME Journal of Tribology* 127 (2006) 37-46

Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VIII

Universitas Diponegoro, Semarang 11-12 Agustus 2009

- [18] H. Yoshizawa, Y.L. Chen, J. Israelachvili, Fundamental mechanism of interfacial friction, 1. relation between adhesion and friction, *Journal of Physical Chemistry* 97 (1993) 4128-4140
 - [19] M. Eriksson, F. Bergman, S. Jacobson, On the nature of tribological contact in automotives brake, *Wear* 252 (2002) 26-36
-