

ANALISIS GETARAN DAN SUARA PADA REM CAKRAM SAAT BEROPRASI

Meifal Rusli, Mulyadi Bur, Harri Hidayat

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Andalas
Kampus Limau Manis, Padang 25163 Sumatera Barat
Telp. 0751-72586, Email : meifal@ft.unand.ac.id

ABSTRAK

Rem cakram merupakan salah satu jenis rem yang secara luas digunakan pada sistem pengereman kendaraan modern. Munculnya suara bising ketika proses pengereman dilakukan seperti groan, judder, moan dan squeal masih menjadi masalah pada kebanyakan sistem pengereman. Suara bising tersebut muncul karena terjadi getaran pada komponen pendukung sistem pengereman seperti piringan, kampas dan kaliper rem. Getaran yang terjadi pada sistem pengereman dikategorikan sebagai getaran tereksitasi sendiri (self excited vibration) yang disebabkan adanya gesekan pada piringan dan kampas rem yang dikenal juga dengan friction-induced vibration. Salah satu jenis suara yang sangat mengganggu adalah squeal noise (suara lengkingan) yang mempunyai frekuensi di atas 1000 Hz. Suara ini berasal dari getaran rem tak stabil saat beroperasi yang tidak saja mengganggu ketenangan juga menurunkan kinerja rem.

Untuk menghindari pengaruh negatif getaran tersebut, maka pada tahap awal perlu diidentifikasi model getaran yang dapat mengganggu unjuk kerja rem. Oleh karena itu, pengujian perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi getaran pada rem dan menganalisis parameter-parameter yang berpengaruh terhadap respon getaran yang terjadi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan variasi tekanan dan kecepatan, kecenderungan respon getaran yang didapatkan tidak berubah. Sebaliknya didapatkan pola respon getaran yang berbeda dengan adanya perubahan kondisi operasional rem (pemakaian pegas anti rattle, penguncian baut, dan lapisan kotoran). Dari hasil pengukuran juga ditemukan dua model getaran yang terjadi pada kampas, yaitu getaran harmonik dengan spektrum frekuensi sesuai dengan frekuensi pribadi kampas, dan respon getaran stick-slip dengan spektrum frekuensi hanya mempunyai satu puncak (4000 Hz) dan harmoniknya. Respon dengan pola stick-slip mempunyai amplitudo yang jauh lebih besar dibanding dengan respon getaran harmonik. Pola ini memperlihatkan kemungkinan munculnya squeal noise pada beban pengereman lebih besar.

Keyword : gesekan menginduksi getaran, stick-slip, squeal noise, rem cakram.

1. Pendahuluan

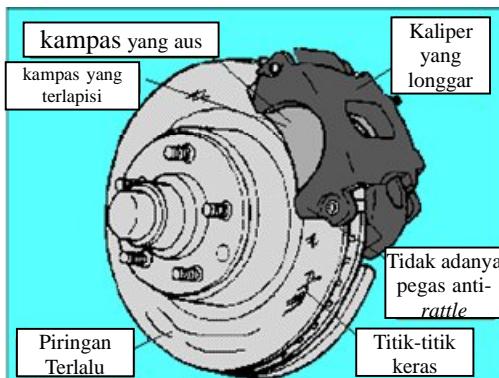
Rem merupakan suatu komponen pendukung pada kendaraan bermotor yang berfungsi untuk mendisipasi energi gerak kendaraan sehingga kendaraan mengalami perlambatan. Prinsip kerja dari rem ini yaitu adanya gesekan antara piringan (*brake rotor*) dengan kampas rem (*brake pad*) pada saat kedua komponen rem ini berkontak. Dengan adanya gaya gesek tersebut, energi kinetik dari kendaraan diubah menjadi panas dan bunyi pada saat rem beroperasi.

Getaran pada komponen rem pada saat beroperasi pada kondisi tertentu dapat menimbulkan suara bising (*noise*) yang berasal dari getaran elemen-elemen rem tersebut. Suara bising tersebut berupa *Squeals*, *groans*, *judder*, dan *moan* yang sering mengakibatkan ketidaknyamanan saat rem bekerja [1]. Secara umum

suara bising diklasifikasikan menjadi dua, pertama yaitu noise berfrekuensi rendah (≤ 1000 Hz) contohnya *judder*, *groan* dan *moan*, dan kedua yaitu noise berfrekuensi tinggi (>1000 Hz) contohnya *squeal* [2].

Getaran pada rem terjadi ketika terdapat kontak antara piringan dan kampas saat rem beroperasi. Ketidakrataan permukaan rotor (kekasaran permukaan) dan faktor gesekan mengakibatkan kampas tertumbuk dan berguncang. Pada akhirnya kampas bergetar pada kaliper, dan menyebabkan kaliper ikut bergetar. Ketiga komponen yaitu piringan, kampas, dan kaliper selanjutnya memiliki peran penting terhadap terjadinya bunyi saat pengereman dilakukan. Beberapa sumber penyebab munculnya suara pada rem dapat amati pada Gambar 1





Gambar 1. Beberapa kemungkinan faktor penyebab suara bising [1]

2. Geseikan Menginduksi Getaran dan Suara

Fenomena geseikan menginduksi getaran dan suara merupakan fenomena yang meliputi beberapa disiplin ilmu dan berbagai tingkatan mulai dari nano, mikro dan makro serta berkaitan dengan kontak mekanik, tribologi, nonlinear dinamik, dan akustik [2]. Fenomena ini dapat menunjukkan beberapa karakteristik, seperti getaran tetap atau tereksitasi sendiri, getaran deterministik atau random, stationer atau tidak-stationer bergantung pada sistem dan kondisi.

Terdapat beberapa fenomena dinamik yang spesifik dan mekanisme yang berkaitan dengan geseikan yang menginduksi getaran, beberapa mekanisme yang dikemukakan antara lain :

- Stick Slip
- Geseikan bergantung pada kecepatan
- Modus terkopel
- Ketidakrataan
- Vibro-impact
- Random impact
- Sprag-slip
- Parametric resonance
- Ketidakseimbangan

Gerakan *stick-slip* adalah proses “terkait-terlepas” yang dihasilkan oleh variasi koefisien gesek akibat efek perbedaan antara koefisien gesek kinetik dan statik. Sedangkan geseikan yang bergantung pada kecepatan (*velocity-dependent friction*) terjadi jika terdapatnya kemiringan negatif dari kurva geseikan-kecepatan. Hal ini memberikan efek yang setara dengan redaman negatif pada gerakan sistem dinamik dan oleh sebab itu menyebabkan ketidakstabilan sistem.

Sistem dengan modus terkopel disebabkan oleh terkopelnya dua modus yang berdekatan karena kondisi tertentu. Secara matematika, kedua modus tersebut membentuk eigenvalue dan eigenvector kompleks, yang dalam respon getarannya menimbulkan getaran tak stabil. Getaran yang terjadi pada sistem penggeraman

merupakan getaran yang tereksitasi sendiri atau *self excited vibration* dimana sistem tersebut menghasilkan sejumlah eksitasi yang menghasilkan gerak osilasi pada sistem itu sendiri [3]. Mekanisme terjadinya getaran dan suara pada rem merupakan kombinasi antara mekanisme yang telah diterangkan sebelumnya.

Squeal noise (suara lengkingan) merupakan suara pengganggu terbesar yang dihasilkan oleh rem pada saat bekerja. Suara lengkingan ini disebabkan oleh getaran yang tidak stabil pada komponen rem. Bunyi jenis ini terjadi pada tingkat tekanan suara (SPL) yang tinggi dan pada frekuensi tertentu dengan range antara 1 hingga 20 kHz. Namun hingga saat ini belum ada hasil yang cukup memuaskan yang mampu membuat pemodelan dan prediksi mengenai kemunculan squeal noise tersebut [4].

Squeal noise didefinisikan sebagai noise yang memiliki frekuensi 1000 Hz atau lebih yang terjadi ketika sistem memiliki amplitudo getaran yang sangat tinggi. Terdapat empat teori yang mencoba menjelaskan bagaimana terjadinya fenomena tersebut muncul, yaitu stick-slip, sprag-slip, redaman negatif, dan modus terkopel. Tiga teori pertama dapat menjelaskan terjadinya ketidakstabilan struktur saat bergesekan, tetapi tidak dapat menjelaskan mengapa suara hanya mempunyai satu atau dua frekuensi.

Selain itu, mekanisme modus terkopel dikembangkan untuk melihat fenomena getaran tak stabil akibat geseikan. Pada mekanisme ini dijelaskan pengaruh dari koefisien gesek dan kekakuan kontak pada sistem, dimana faktor tersebut menyebabkan modus satu atau dua pasang modus getar yang berdekatan bergabung menghasilkan modus getar kompleks yang tidak stabil.

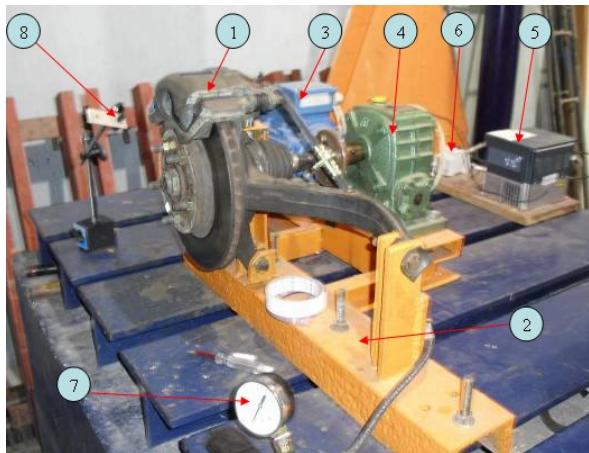
Dari hasil simulasi diperoleh bahwa modus terkopel terjadi pada rentang tertentu dari kekakuan kontak dan koefisien gesek. Modus terkopel ini menyebabkan terjadinya getaran tidak stabil pada sistem yang akhirnya menimbulkan bunyi melengking. Jika dihubungkan kekakuan kontak dengan aspek geometri kampas rem seperti kekasaran permukaan, maka permukaan kampas yang lebih halus akan memberikan kekakuan kontak yang lebih tinggi dengan tekanan penggeraman yang sama [5].

3. Pengujian Getaran Pada Rem Cakram

3.1 Perangkat Pengujian

Perangkat pengujian yang dirancang tersusun atas beberapa komponen utama antara lain : 1 set rem cakram mobil, Pengendali motor listrik tiga fasa (*Motor Driver*), dan pereduksi putaran. Susunan alat pengujian diperlihatkan pada Gambar 2





Gambar 2. Rangkaian alat pengujian

Keterangan :

1. 1 Set rem cakram
2. Rangka dudukan Rem
3. Motor Listrik 3 fasa dengan daya 2 HP
4. Pereduksi putaran
5. Pengendali motor
6. Pemutus arus pada rangkaian (*Circuit Breaker*)
7. *Pressure Gauge*
8. Penegak Magnetik

Sementara itu instrumen dan perangkat lunak yang digunakan dalam pengujian adalah akselerometer, *impact-hammer*, Pengendali motor (inverter), PULSE Dynamics Signal Analyzer, *Pressure Gauge*, PULSE 6.1, dan Matlab 6.5

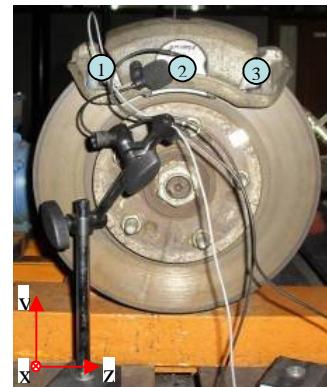
3.2 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu *impact testing* untuk mendapatkan frekuensi pribadi masing-masing komponen pada saat berkontak maupun tidak berkontak. *Impact testing* ini dilakukan untuk mengetahui respon fungsi frekuensi komponen yang diuji pada variasi tekanan hidrolik yang diberikan yaitu 1 bar (rem belum beroperasi), 10 bar serta 20 bar. Tujuan pengujian ini adalah untuk mendapatkan frekuensi pribadi masing-masing sistem.

Selanjutnya adalah pengukuran respon getaran dan suara saat rem beroperasi. Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap respon getaran kampas rem pada masing-masing titik pengujian dan suara yang muncul saat rem beroperasi. Penempatan sensor akselerometer dan microphone serta penambahan massa pada kaliper ditunjukkan pada gambar 3.

Kampas rem yang digunakan pada pengujian ini adalah Kampas yang sudah dipakai dan belum mencapai batas keausannya. Titik pusat pengamatan adalah getaran yang terjadi pada Kampas, dan pengaruhnya terhadap kaliper dan piringan. Posisi pengukuran pada kampas

dapat diamati pada Gambar 3, yaitu pada sisi kiri, kanan dan bagian tengah kampas. Karena hanya pada ketiga posisi tersebut pengukuran dapat dilakukan. Pengujian dilakukan dengan variasi kecepatan putar, tekanan hidrolik, dan kondisi pemasangan. Kondisi pemasangan dapat diamati pada Tabel 1.



Gambar 3. Setup pengukuran respon getaran pada *pad* saat rem beroperasi

Tabel 1. Pengaturan pemasangan (*setup*) rem pada pengujian

Kondisi <i>Setup</i> Rem	A	B	C	D
Pegas Anti-Rattle	Y	Y	N	N
Baut Pengunci	Y	N	Y	Y
Lapisan Kotoran	N	N	N	Y

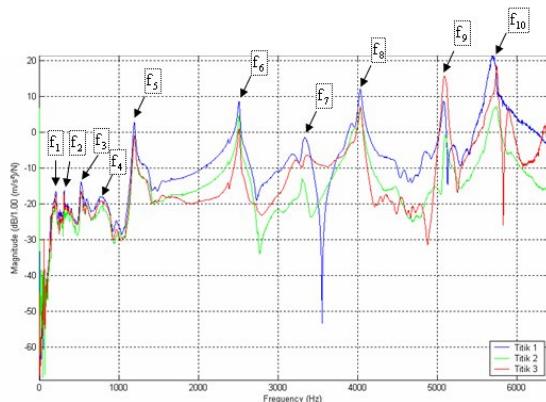
4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengujian getaran sebelum beroperasi

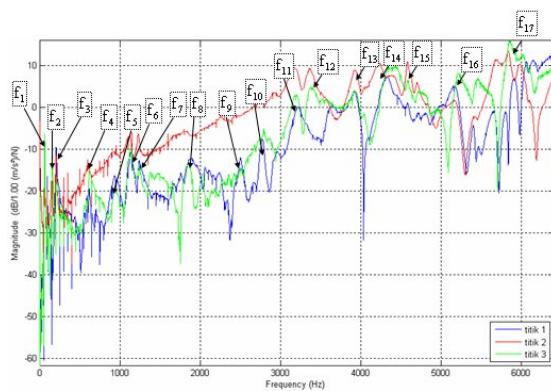
Pengujian menggunakan metode *impact testing* (menggunakan eksitasi gaya impact) digunakan untuk mendapatkan nilai *eigenvalue* atau frekuensi pribadi dari struktur yang diuji. Beberapa respon fungsi frekuensi hasil dari *Impact testing* pada piringan rem dan pad dapat diamati pada Gambar 4 dan 5

Pada gambar 5 diperlihatkan bahwa frekuensi resonansi yang merupakan frekuensi pribadi dari kampas rem relatif tidak sama pada masing-masing titik. Hal ini disebabkan oleh adanya kontak antara kampas rem dengan piringan serta kontak antara kampas rem dengan kaliper. Selain itu adanya kontak tersebut menyebabkan terjadinya ketidaklinieran pada struktur yang ditunjukkan oleh FRF-coherence yang bernilai rendah dan cenderung buruk (nilai koherensi yang baik yaitu mendekati 1). Pada tabel 2 ditampilkan frekuensi pribadi dari ketiga sistem yang diuji.





Gambar 4. Fungsi respon frekuensi (FRF) pada piringan



Gambar 5. FRF pada Pad kampas rem

Tabel 2. Frekuensi pribadi pada tiap komponen

Frekuensi Ke-	Frekuensi (Hz)		
	Piringan	Kampas	Kaliper
1	208	66	64
2	312	158	144
3	522	208	322
4	806	622	522
5	1196	940	900
6	2510	1136	1348
7	3360	1246	1988
8	4038	1856	2176
9	5082	2504	2538
10	5688	2790	3712
11		3194	3998
12		3362	5346
13		3934	
14		4240	
15		4588	
16		5266	
17		5858	

4.2 Pengujian terhadap kampas rem saat beroperasi

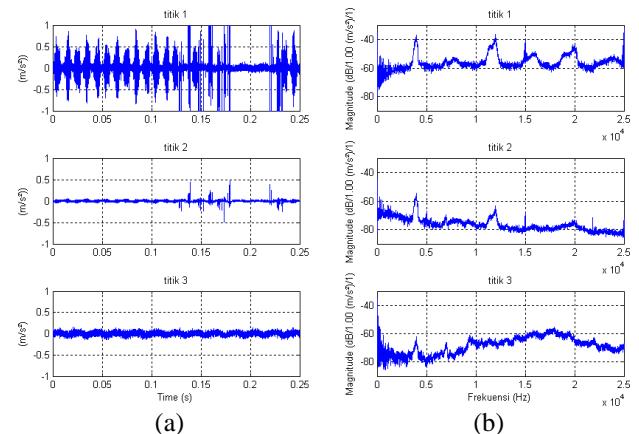
Adanya gesekan antara kampas dan piringan rem saat sebuah rem beroperasi menyebabkan terjadinya getaran pada komponen sistem pengereman tersebut. Getaran terjadi pada semua komponen pendukung sistem pengereman saat rem beroperasi, namun pengujian kali ini dilakukan hanya pada kampas rem dengan beberapa variasi parameter, yaitu

1. Kecepatan putar piringan
2. Tekanan pengereman.
3. Skema pemasangan rem.

4.2.1 Respon getaran pada kampas rem dengan skema A

Pada pengujian respon getaran kampas dengan skema A (seperti yang telah dibahas pada bagian 3) dimana kampas rem dipasang dengan menggunakan pegas *anti-rattle*, baut kaliper terkunci baik dan tanpa lapisan kotoran (debu asbestos dan air) diperoleh hasil bahwa respon masing-masing titik pengujian menunjukkan kecenderungan yang berbeda. Salah satu hasil pengujian tersebut dalam domain waktu dan frekuensi diperlihatkan pada Gambar 6.

Pada Gambar 6 (a) dapat dilihat bahwa telah terjadi fenomena *stick-slip* pada titik 1, hal ini ditandai dengan nilai percepatan yang rendah saat terjadi *stick* dan kemudian sistem bergetar pada saat terjadi *slip*. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa nilai amplitudo percepatan terbesar terjadi pada titik 1 dan terendah pada titik 2. Data autospektum pada Gambar 6 (b) juga menunjukkan bahwa kecenderungan level getaran cenderung lebih besar pada titik 1 dan paling rendah pada titik 2. Dari gambar tersebut juga dapat diamati bahwa puncak spektrum muncul pada frekuensi 4000 Hz dan beberapa harmoniknya.

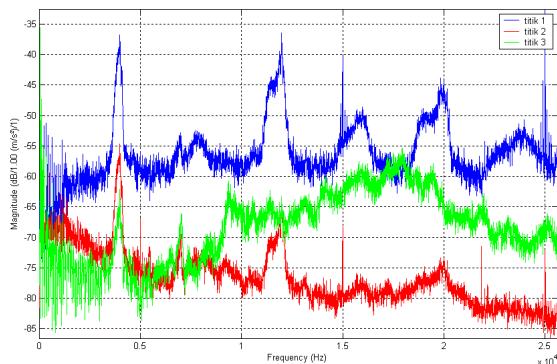


Gambar 6. Respon getaran pada kampas rem dengan Skema A, tekanan 5 bar dan putaran 75 rpm. (a) domain waktu, (b) spektrum

Gambar 7 memperlihatkan spektrum frekuensi dari getaran kampas pada kecepatan 75 rpm dan tekanan 5 bar. Pada gambar tersebut terlihat bahwa pada frekuensi

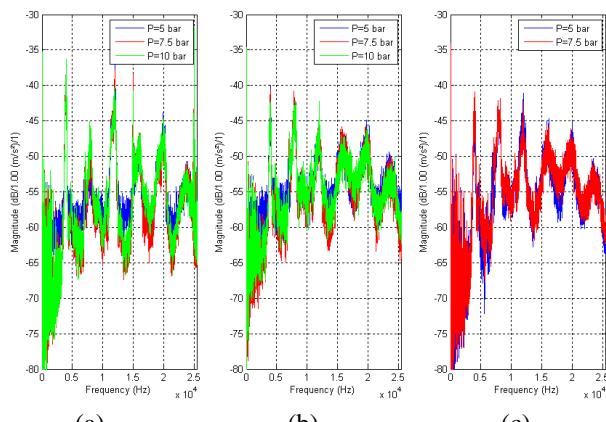


sekitar 4000 Hz *level* getaran paling kecil terjadi pada titik 3 (titik ujung akhir kampas).



Gambar 7. Spektrum Frekuensi respon kampas rem skema A pada beberapa titik searah sumbu x dengan tekanan 5 bar dan putaran 75 rpm

Pada Gambar 8 ditampilkan spektrum frekuensi dari getaran kampas pada titik 1 dengan kecepatan putar 75, 112.5, 150 rpm dan beberapa variasi tekanan. Bentuk spektrum frekuensi cenderung sama, dan tidak tampak perubahan yang signifikan terhadap frekuensi dan *magnitude* getaran dengan terjadinya perubahan tekanan. Berdasarkan kurva spektrum frekuensi pada kecepatan 75 rpm dan variasi tekanan 5, 7.5, dan 10 bar frekuensi resonansi yang muncul adalah sebagai berikut dapat dilihat pada tabel 3.



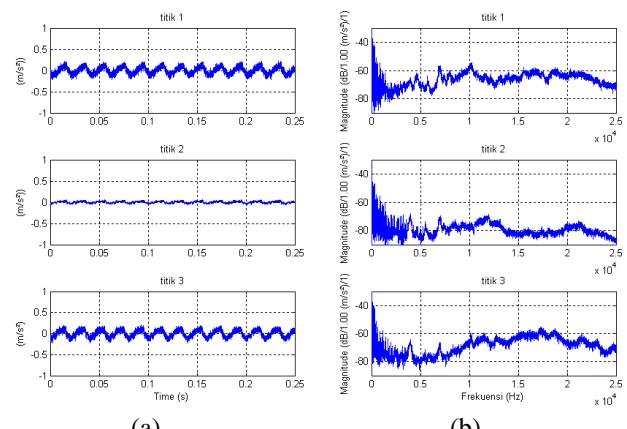
Gambar 8. Spektrum frekuensi respon kampas rem di titik 1 dengan parameter skema A, (a) putaran 75 rpm (b) putaran 112.5 rpm (c) putaran 150 rpm

4.2.2 Respon getaran pada kampas rem dengan skema B

Pada pengujian respon getaran dengan pemasangan rem skema B dimana kampas rem dipasang dengan menggunakan pegas anti-*rattle*, tanpa lapisan kotoran dan baut kaliper tidak terkunci baik, diperoleh hasil dalam domain waktu dan domain frekuensi yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Tabel 3. Nilai frekuensi resonansi kampas rem saat beroperasi rentang pengamatan 0 – 25400 Hz

Frekuensi Resonansi	Nilai Frekuensi (Hz)
1	3984
2	7748
3	11980
4	15984
5	19824
6	23964

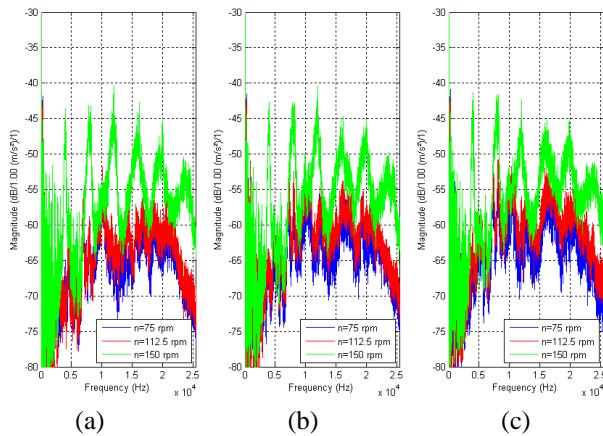


Gambar 9. Respon getaran pada kampas rem dengan skema B, tekanan 5 bar dan kecepatan putar 75 rpm. (a) domain waktu, (b) spektrum

Pada pengujian getaran dengan pemasangan rem menggunakan skema B diperoleh hasil bahwa level getaran antara titik 1 dan titik 3 cenderung sama. Begitu juga dengan respon getaran dalam domain waktu yang mana titik 1 dan titik 3 menunjukkan kecenderungan yang sama. Dari spektrum frekuensi yang ditampilkan tidak ditemukan adanya frekuensi yang mendominasi beserta harmoniknya, seperti yang ditemukan pada skema A. Walaupun dalam domain waktunya gejala *stick-slip* masih terlihat.

Akan tetapi respon getaran pada kecepatan 150 rpm seperti yang terlihat pada Gambar 10, ditemukan getaran dengan dominasi frekuensi sekitar 4000 Hz beserta harmoniknya dengan magnitudo yang lebih besar dibanding pada kecepatan putar yang lain. Perbandingan respon getaran kampas rem pada titik 1 dengan skema B terhadap variasi tekanan 5, 7.5, dan 10 bar seperti yang diperlihatkan pada Gambar 10 memberikan hasil bahwa pada kecepatan tinggi (150 rpm) level getaran yang diperoleh lebih besar dari variasi kecepatan lainnya dan respon getaran relatif sama dengan adanya variasi tekanan.

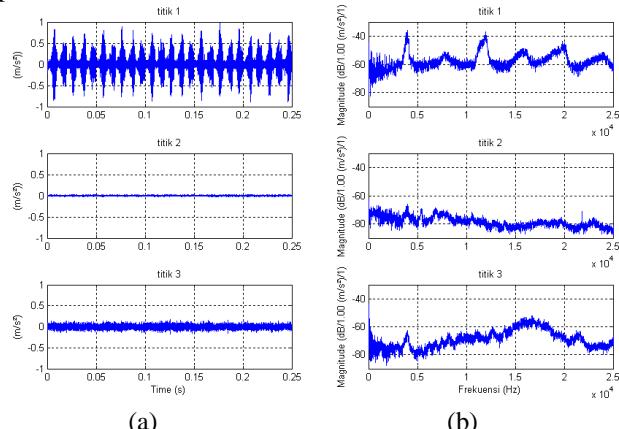




Gambar 10 Spektrum frekuensi respon kampas rem di titik 1 dengan skema B (a) tekanan 5 bar (b) tekanan 7.5 bar (c) tekanan 10 bar

4.2.3 Respon getaran pada kampas rem dengan skema C

Pada pengujian respon getaran dengan pemasangan rem skema C dimana kampas rem dipasang tidak menggunakan pegas anti-*rattle*, baut kaliper terkunci baik dan tanpa lapisan kotoran diperoleh hasil dalam domain waktu dan domain frekuensi yang ditunjukkan pada Gambar 11.

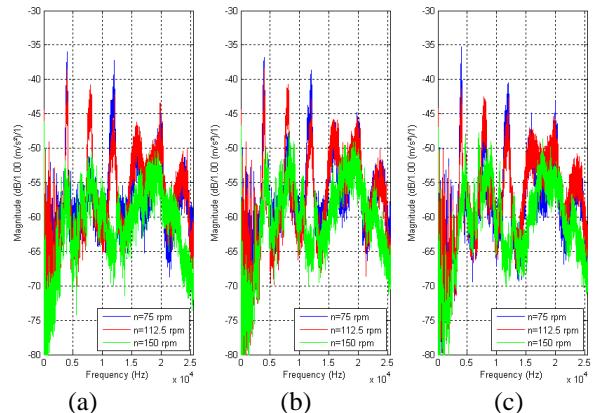


Gambar 11 Respon getaran pada kampas rem dengan skema C, tekanan 5 bar dan kecepatan putar 75 rpm. (a) domain waktu, (b) spektrum

Pada pengujian getaran dengan pemasangan rem skema C diperoleh respon getaran yang cenderung mirip dengan respon getaran pada skema A. Apabila diamati respon getaran dalam domain waktu, fenomena *stick-slip* juga terjadi di titik 1. Sedangkan jika diamati respon getaran secara keseluruhan diperoleh bahwa urutan magnitude getaran paling besar di titik 1, kemudian di titik 3 dan paling kecil di titik 2.

Sama halnya dengan pengujian dengan skema sebelumnya (skema A dan B), variasi tekanan 5, 7.5, dan 10 bar pada kecepatan tertentu cenderung tidak mempengaruhi respon getaran yang didapatkan. Akan

tetapi jika dibandingkan respon getaran terhadap variasi kecepatan 75, 112.5, dan 150 rpm diperoleh hasil bahwa level getaran tertinggi terjadi pada kecepatan rendah yaitu kecepatan putaran 75 rpm seperti yang diperlihatkan pada gambar 12.



Gambar 12. Spektrum frekuensi respon kampas rem di titik 1 dengan skema C (a) tekanan 5 bar (b) tekanan 7.5 bar (c) tekanan 10 bar

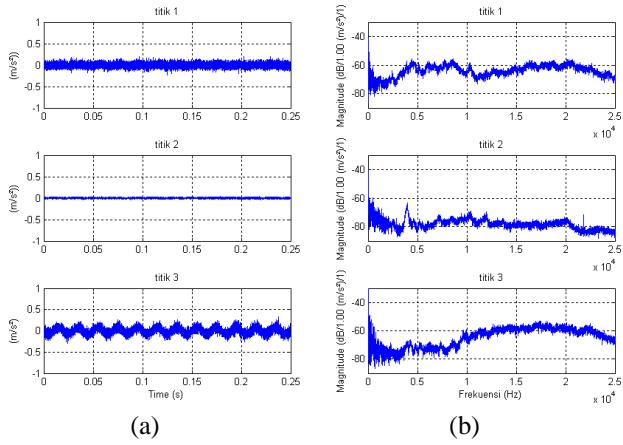
Apabila dibandingkan fenomena *stick-slip* yang terjadi pada skema A dan C dengan variasi tekanan, diperoleh hasil bahwa respon getaran dalam domain waktu menunjukkan kecenderungan level dan periode *stick-slip* yang sama dimana fenomena *stick-slip* terjadi 10 kali dalam rentang waktu 0.1 s. Dapat diartikan juga untuk kondisi kampas 1 dengan skema pemasangan rem A dan C telah terjadi *stick-slip* pada titik 1. Perbandingan data dalam domain waktu dengan variasi tekanan tersebut dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 11.

4.2.4 Respon getaran pada kampas rem dengan skema D

Pada pengujian respon getaran dengan pemasangan rem skema D dimana kampas rem dipasang tidak menggunakan pegas anti-*rattle*, baut kaliper terkunci baik dan dengan lapisan lapisan kotoran diperoleh hasil dalam domain waktu dan domain frekuensi yang ditunjukkan pada gambar 13.

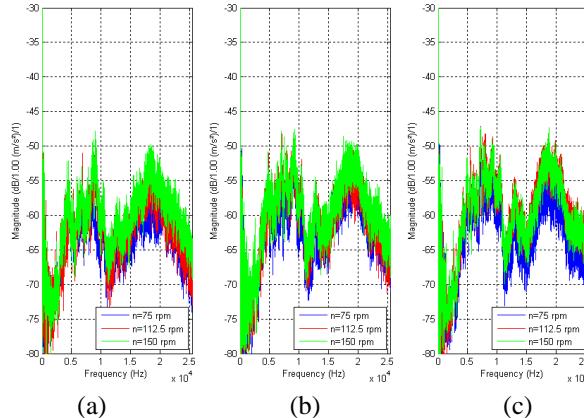
Dari pengujian dengan pemasangan rem menggunakan skema D diperoleh respon getaran yang cenderung berbeda dari pemasangan rem menggunakan skema lainnya. Dari gambar 13 (a) dapat diamati bahwa respon pada titik 1 cenderung acak. Hal ini kemungkinan diakibatkan pengaruh dari partikel kotoran yang berasal dari debu asbestos ditambah air yang menyebabkan sistem tereksitasi secara acak. Selain itu, dapat diamati juga bahwa level getaran antara titik 1 dan titik 3 relatif sama.





Gambar 13 Respon getaran pada kampas rem skema D, tekanan 5 bar dan kecepatan putar 75 rpm. (a) domain waktu, (b) spektrum

Pada gambar 14 diperlihatkan bahwa variasi tekanan terhadap variasi kecepatan 75, 112.5, dan 150 rpm cenderung tidak mempengaruhi respon getaran yang terjadi pada rem.



Gambar 14 Spektrum frekuensi respon pada rem di titik 1 dengan skema D (a) tekanan 5 bar (b) tekanan 7.5 bar (c) tekanan 10 bar

Variasi kecepatan terhadap tekanan yang sama memberikan hasil bahwa level getaran pada kecepatan 150 rpm sedikit lebih besar dibandingkan dengan kecepatan putar 75 dan 112.5 rpm. Level getaran terkecil terjadi pada kecepatan putaran 75 rpm. Jika dibandingkan respon getaran akibat variasi tekanan 5, 7.5, dan 10 bar serta variasi kecepatan 75, 112.5, dan 150 rpm diperoleh bahwa variasi tersebut cenderung tidak mempengaruhi model respon getaran yang terjadi pada kampas rem seperti yang terlihat pada gambar 14.

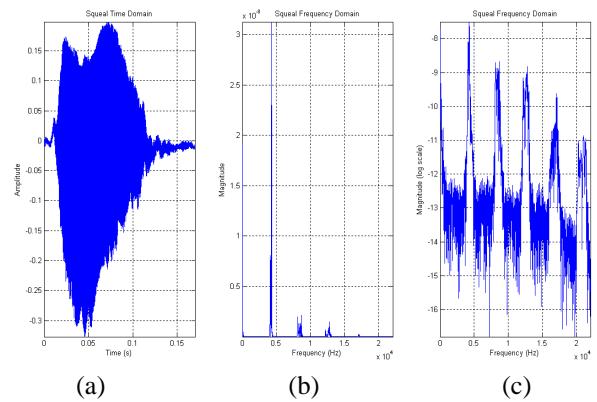
4.3 Prediksi kemunculan bunyi melengking saat rem beroperasi

Bunyi melengking merupakan suara bising yang muncul pada saat rem beroperasi dan memiliki frekuensi lebih dari 1000 Hz. Terdapat beberapa kemungkinan penyebab terjadinya bunyi melengking pada rem cakram

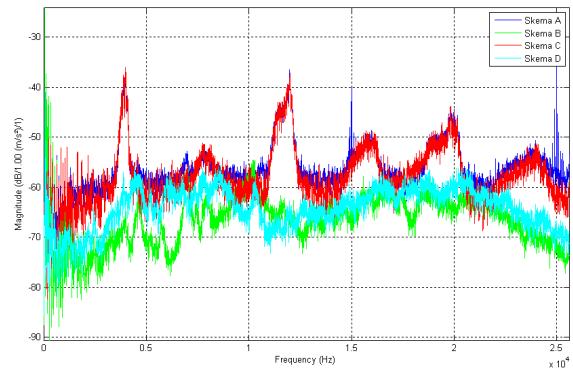
diantaranya kelonggaran dalam pemasangan kaliper atau berhubungan dengan baut pengencangan, permukaan piringan yang kasar, kampas rem yang sudah aus, titik keras pada piringan, ada atau tidaknya pegas anti-rattle, dan adanya lapisan pengotor [1]. Pada pengujian yang telah dilakukan, parameter yang kemungkinan dapat menyebabkan munculnya bunyi melengking tersebut dikelompokkan ke dalam 4 skema pengujian.

Salah satu ciri suara lengking ini adalah spektrum frekuensi suara didominasi oleh hanya satu puncak frekuensi dan beberapa harmoniknya [4,5,6]. Juga dari beberapa pengukuran ditemukan hal yang sama, seperti yang diperlihatkan pada gambar 15. Gambar 15 menunjukkan hasil rekaman suara lengkingan salah satu rem saat beroperasi.

Berdasarkan hasil pengukuran respon getaran pada kampas rem dengan beberapa skema didapatkan hasil bahwa pola bunyi melengking ini ditemukan pada pengukuran di titik 1. Perbandingan beberapa respon getaran di titik 1 dengan berbagai skema diperlihatkan pada Gambar 16.



Gambar 15. Hasil pengukuran sinyal suara squeal noise (a) domain waktu, (b) domain frekuensi, (c) domain frekuensi dengan skala log



Gambar 16. Respon getaran pada pad kampas rem di titik 1

Dengan perbandingan yang ditampilkan pada Gambar 16, bunyi melengking kemungkinan terjadi pada



titik 1 dengan skema A yaitu pemasangan rem dengan penguncian baut kaliper yang baik, memakai pegas anti-rattle, dan tanpa lapisan kotoran. Pola bunyi melengking juga muncul pada titik 1 dengan skema C yaitu penguncian baut kaliper yang baik, tanpa lapisan kotoran, dan tidak menggunakan pegas anti-rattle.

Berdasarkan data respon getaran pada titik 1 dalam domain waktu, pola bunyi melengking yang muncul pada titik 1 dengan skema pemasangan rem A dan C diikuti dengan respon getaran yang sama. Yaitu munculnya fenomena *stick-slip* yang cenderung sama dengan variasi tekanan. Dapat diartikan bahwa pola bunyi melengking yang terjadi disebabkan oleh adanya eksitasi pada titik 1 dengan mekanisme *stick-slip*. Akan tetapi pada saat pengujian dengan skema A dan C tersebut tidak ditemukan bunyi. Hal ini kemungkinan disebabkan *level* getaran yang terjadi tidak terlalu besar sehingga bunyi melengking (*squeal noise*) tersebut tidak terdengar oleh telinga.

Selain itu, bunyi melengking kemungkinan ditimbulkan oleh beberapa komponen yang bergetar pada sistem pengereman. Komponen tersebut yaitu piringan, kampas, dan kaliper rem. Dari pengukuran respon getaran pada kampas rem dengan penambahan massa pada kaliper, diperoleh respon getaran yang cenderung sama dengan respon getaran ketika tidak diberikan penambahan massa pada kaliper. Berdasarkan hal tersebut dapat diartikan bahwa adanya penambahan massa kaliper tidak terlalu berpengaruh terhadap respon kampas rem dan dapat disimpulkan bahwa kaliper tidak terlalu berpengaruh terhadap munculnya bunyi melengking saat pengereman dilakukan.

5.Kesimpulan

Kaji eksperimental terhadap respon getaran pada komponen-komponen pendukung rem cakram (piringan, kampas dan kaliper) sebelum dan saat rem beroperasi memberikan kesimpulan sebagai berikut,

1. Variasi tekanan dan kecepatan tersebut tidak terlalu mempengaruhi pola respon getaran yang terjadi. Respon getaran pada kampas rem dipengaruhi oleh kondisi pemasangan rem atau *setup* rem.
2. Respon getaran yang terjadi pada tiga titik pengukuran dengan kondisi operasi yang sama menunjukkan hasil yang relatif berbeda. Hal ini dipengaruhi oleh ketidakseragaman eksitasi yang terjadi dan faktor redaman pada masing-masing titik.
3. Ditemukan fenomena "*stick-slip*" terjadi pada titik 1 kampas rem dengan skema A (penguncian baut yang baik, memakai pegas anti-rattle dan tanpa

lapisan pengotor) dan skema C (penguncian baut kaliper baik, tanpa pegas anti-rattle dan lapisan pengotor). Frekuensi terjadinya "*stick-slip*" tersebut relatif sama pada variasi tekanan dan putaran, dimana *stick-slip* ini terjadi 10 kali dalam selang waktu 0.1 s.

4. Pola respon getaran yang menyebabkan bunyi melengking ditemukan pada titik 1 (titik awal kontak antara kampas dan piringan) dengan kondisi pemasangan rem : baut kaliper terkunci baik, tanpa lapisan kotoran (debu asbestos dan air), dengan pegas anti-rattle (skema A) dan tanpa pegas anti-rattle (skema C). Namun suara *squeal noise* tidak muncul disebabkan level getaran yang tidak cukup besar untuk membuat suara bising terdengar.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai dari hibah penelitian strategis nasional dana DIPA Universitas Andalas, tahun 2009-2010. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih.

Daftar Kepustakaan

- [1]. Carley, L., 2009, *Silencing Disc Brake Squeal*, www.aa1car.com.
- [2]. Sheng, G., 2008, *Friction Induced Vibrations and Sound, Principle and Application*, CRC Press, Boca Raton.
- [3]. Thorby, D., 2008, *Structural Dynamics and Vibration Practice*, Elsevier, Oxford.
- [4]. Rusli, M. dan 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, pp. 585-595
- [5]. Rusli, M., Okuma, M., dan Son, L., 2009, *Analisis Teoritik Pengaruh Kekasaran Permukaan Kontak Terhadap Munculnya Suara Lengkingan pada Rem Kendaraan*, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-8,
- [6]. Triches, M., Gerges, S.N.Y, dan Jordan, R., 2004, *Reduction of squeal noise from disc brake systems using constrained layer damping*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Rio de Janeiro
- [7]. Blau, P. J. , 2009, *Friction Science and Technology from concepts to Applications*, CRC Press, Boca Raton
- [8]. Silva, C., 2007, *Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation*, CRC Press, Boca Raton.

