

Pengaruh Ukuran Partikel dan *Feed Rate* Pasir pada Sistem *Sanding* Kereta Api terhadap Kecepatan Putaran dan Kekasaran Permukaan Roda dan Rel

Paryanto*, Angga Josua Simanjuntak, Rusnaldy

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedharto, SH, Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

*E-mail: paryanto@ft.undip.ac.id

Abstract

Sanding is a method where a certain amount of sand is sprayed between the wheels and rails during emergency braking or other operations that require high coefficient of friction. However, an inappropriate sanding method can accelerate the wear and damage the surface of the wheels and rail. Therefore, this study aims to determine the most efficient parameters of the sand size and its feed rate for increasing the friction coefficient between the wheels and rails. The experimental is conducted using ST 60 steel for the wheel and ST 90 steel as rail test specimen. The experiments are done by rotating the wheel specimen on the rail specimen with a constant speed at 400 rpm. After that, water is dropped to the surface of the wheels and rails specimens at the flow rate 2 ml/min to create a wet surface condition. In the experiments set up, there are three sand variations of grain size, i.e. mesh 80-200, mesh 30-50, and mesh 20-30 with sanding rate 5 gram/min, 7 gram/min, and 10 gram/min. Based on the experimental results, it was found that the larger the sand grain size and feed rate, the slip ratio between the wheel and rail will decrease but the surface roughness of the wheel and rail will also increase. The optimal sand size for reducing the slip ratio between wheels and rails is 20-30 mesh sand (with 0.595-0.841 mm grain size) and at 10 gram/min feed rate. At this condition, the slip ratio between the wheel and rail is reduced to 1.05% with surface roughness value (*Ra*) of wheel 4.84 μm and 3.87 μm for rail specimen.

Keywords: Slip ratio, sanding, surface roughness, sand, rail and wheel.

Abstrak

Sanding adalah metode penyemprotan pasir dalam jumlah tertentu di antara roda dan rel saat pengereman darurat atau operasi lain yang membutuhkan koefisien friksi yang tinggi. Namun metode *sanding* dapat menciptakan masalah bila tidak diterapkan secara benar, yaitu naiknya laju kekasaran permukaan pada roda dan rel. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan ukuran dan *feed rate* pasir yang optimal agar selain laju kekasaran permukaannya rendah, juga dapat meningkatkan koefisien gesek antara roda dan rel. Penelitian ini menggunakan baja ST 60 untuk spesimen uji roda dan baja ST 90 sebagai spesimen uji rel. Pengujian dilakukan dengan cara memutar spesimen roda di atas spesimen rel dengan dengan kecepatan konstan 400 rpm. Setelah itu air diteteskan pada permukaan roda dan rel dengan laju 2 ml/min untuk menciptakan kondisi permukaan yang basah. Selanjutnya pasir dengan tiga variasi ukuran partikel yaitu *mesh* 80-200, *mesh* 30-50 dan *mesh* 20-30 diberikan di area kontak roda dan rel dengan laju *feed rate* masing-masing 5 gram/min, 7 gram/min, dan 10 gram/min. Dari hasil pengujian diketahui bahwa semakin besar ukuran partikel dan *feed rate* pasir maka *slip ratio* antara roda dan rel akan semakin menurun akan tetapi kekasaran permukaannya juga akan semakin meningkat. Ukuran pasir yang paling baik dalam mengurangi *slip ratio* antara roda dan rel adalah pasir *mesh* 20-30 (dengan ukuran partikel 0,595-0,841 mm) dengan *feed rate* 10 gram/min. Kondisi tersebut dapat mengurangi *slip ratio* antara roda dan rel sampai 1,05%. Namun pasir ini juga menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang tinggi pula dengan nilai *Ra* sebesar 4,84 μm untuk spesimen roda dan 3,87 μm untuk spesimen rel.

Kata kunci: Slip ratio, sanding, kekasaran permukaan, pasir, roda dan rel.

1. Pendahuluan

Koefisien gesek roda dan rel adalah salah satu parameter yang paling penting dalam proses pengereman. Koefisien gesek diperoleh dari rasio gaya tangensial (pengereman) terhadap gaya normal pada kontak roda dan rel. Dalam kondisi yang bersih, kontak baja dengan baja akan menghasilkan koefisien geseknya lebih besar dari yang diperlukan. Namun jika ada kontaminasi (air atau lumpur) di atas rel, tingkat friksi akan menurun jauh di bawah nilai yang diperlukan untuk operasi pengereman [1]. Jika selama pengereman koefisien geseknya tidak memadai, maka akan menyebabkan jarak berhenti yang lebih panjang. Efek negatif lain yang dapat terjadi adalah terjadinya kerusakan pada roda dan rel seperti penipisan roda (*flat spots*) dan bekas gosong pada rel. *Flat spots* dapat menyebabkan perputaran roda memiliki getaran

yang besar sehingga dapat menyebabkan ketidaknyamanan penumpang bahkan dapat membahayakan. Hal ini dapat menjadi ancaman bagi keamanan operasional kereta api [2]. Pada kereta api ada beberapa sistem pengereman yang digunakan, baik untuk kondisi normal maupun pada kondisi emergency. Literatur review untuk sistem pengereman pada kereta api dapat dilihat pada [3]. Banyak cara yang dilakukan dalam beberapa tahun terakhir untuk meningkatkan koefisien friksi dalam kondisi kontak yang buruk (terkontaminasi air/lumpur). Cara yang paling banyak digunakan adalah *sanding* [4-6].

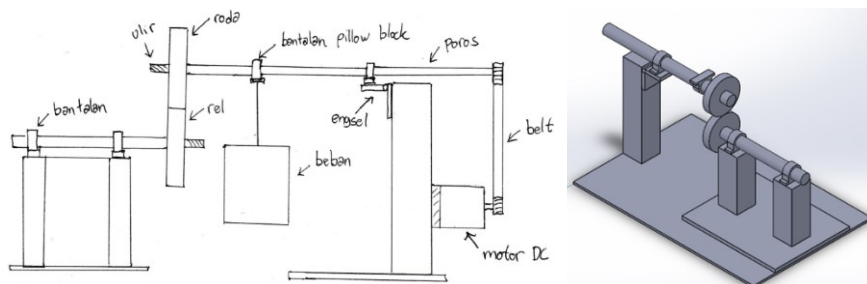
Sanding adalah metode dimana pasir dalam jumlah tertentu disemprotkan di antara roda dan rel saat pengereman atau operasi lain yang membutuhkan koefisien friksi yang tinggi. Namun metode *sanding* dapat menciptakan masalah baru bila tidak diterapkan secara benar, yaitu naiknya laju kekasaran permukaan pada roda dan rel [7-8]. Roda dan rel yang memiliki permukaan kasar akan memiliki ketahanan *fatigue* yang rendah karena adanya konsentrasi tegangan yang terjadi di permukaannya sehingga umur pakai dari roda dan rel akan lebih singkat dari biasanya. Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menentukan standar *feed rate* dan ukuran partikel pasir yang tepat agar selain laju kekasaran permukaannya rendah, juga dapat meningkatkan koefisien gesek antara roda dan rel yang menurun akibat adanya kontaminan.

Pada penelitian ini parameter yang akan dikaji adalah ukuran partikel dan *feed rate* pasir. Meskipun metode *sanding* sudah dipakai sejak dulu, namun spesifikasi ukuran dan *feed rate* pasir sangat beragam di berbagai negara. Sebagian besar kajian yang sudah dilakukan adalah untuk kondisi salju. Sedangkan kajian untuk kondisi basah di daerah tropis belum ada yang dilakukan. Selain itu penelitian ini sekaligus untuk mengidentifikasi efisiensi penggunaan pasir lokal yang ada di Indonesia. Untuk lebih mengerti dengan baik tentang hubungan antara ukuran pasir terhadap kekasaran permukaan roda dan rel, penulis melakukan percobaan pada alat yang didesain khusus untuk percobaan ini yaitu *twin disk roller rig*. Pada percobaan ini, penulis melakukan percobaan pada kondisi roda dan rel basah dengan variasi ukuran partikel dan *feed rate* pasir.

2. Desain alat uji dan metode penelitian

Desain alat uji *twin disk roller rig* ini digunakan untuk mensimulasikan kontak antara roda dan rel (lihat Gambar 1), dan mengevaluasi pengaruh ukuran partikel dan *feed rate* pasir terhadap kecepatan putaran dan kekasaran permukaan roda dan rel dalam kondisi basah. Alat uji ini menggunakan mekanisme penggerak dengan motor listrik DC775. *Timing belt* digunakan untuk menghubungkan motor dengan poros atas untuk memutar piringan roda. Beban seberat 3,015 kg digantung pada poros atas untuk memberikan gaya normal pada area kontak roda dan rel. Kecepatan piringan roda diatur lewat *power supply* sebesar 400 rpm. Durasi pengujian pada tiap-tiap kondisi pengujian sebesar 120 menit. Piringan roda terbuat dari material ST 60 dan piringan rel terbuat dari material ST 90. Kedua piringan mempunyai diameter 47 mm. Komposisi kimia spesimen uji dalam persentase berat dapat dilihat pada Tabel 1. Untuk sifat-sifat mekanis piringan uji dapat dilihat pada Tabel 2.

Pengujian dilakukan dalam kondisi basah dan air diberikan secara terus menerus ke area kontak roda dan rel dengan laju aliran sekitar 2ml/min. Laju aliran ini cukup untuk membuat permukaan roda dan rel tetap basah selama berputar. Kemudian pasir diberikan pada area kontak dengan memanfaatkan gravitasi. Pasir yang digunakan adalah pasir silika. Komposisi utama dari pasir ini adalah SiO₂ dan memiliki nilai kekerasan sekitar 7 Mohs. Pasir yang digunakan pada penelitian ini dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan ukuran partikelnya, yaitu pasir *S* dengan mesh 80-200 (0,074-0,177mm), pasir *M* dengan mesh 30-50 (0,297-0,595 mm), dan pasir *L* dengan mesh 20-30 (0,595-0,841 mm). Foto partikelan pasir dapat dilihat pada Gambar 2. Tiga parameter *feed rate* yang berbeda dipilih untuk penelitian ini, yaitu 5 gram/min, 7 gram/min, dan 10 gram/min.



Gambar 1. Alat uji *twin disk roller rig* sederhana.

Kecepatan putaran piringan roda dan rel diukur menggunakan tachometer laser (Phountuk DT2234C+ *Digital Laser*). Laser diarahkan pada bagian yang reflektif pada poros yang memutar piringan roda dan rel. Data pengukuran kecepatan putaran diperlukan untuk menghitung besar *slip ratio* antara roda dan rel. *Slip ratio* dapat dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$\begin{aligned}
 \text{Slip Ratio (S) \%} &= \left(\frac{V_{\text{wheel}} - V_{\text{vehicle}}}{V_{\text{vehicle}}} \right) \times 100\% \\
 &= \left(\frac{\omega \cdot R_w}{V_v} - 1 \right) \times 100\%
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

dimana ω adalah kecepatan sudut piringan, R_w adalah jari-jari piringan, dan V_v adalah kecepatan translasi kendaraan.

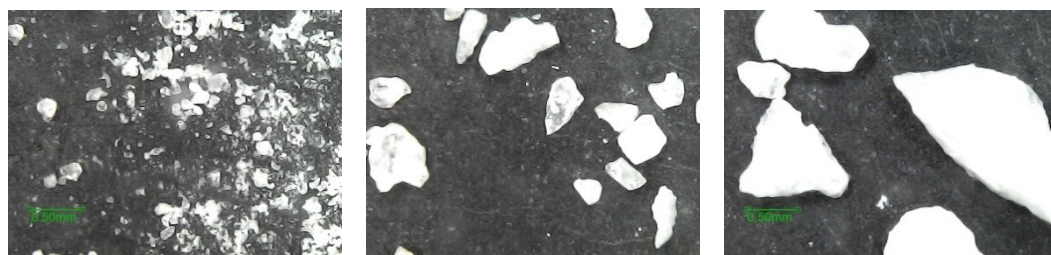
Setelah pengukuran kecepatan putaran selama 2 jam, piringan roda dan rel dilepas dari alat uji dan diukur kekasaran permukaannya menggunakan alat pengukur kekasaran permukaan (Mitutoyo Surftest SJ-301). Kekasaran permukaan diukur sebanyak 3 kali pada titik yang berbeda untuk masing-masing piringan roda dan rel yang sudah diuji menggunakan kondisi pengujian yang berbeda-beda.

Tabel 1. Komposisi kimia piringan roda (ST60) dan piringan rel (ST90).

Material	%wt								
	C	Mn	Si	S	P	N	Ni	Cr	Mo
ST 60	0.40	1.60-1.70	0.55-0.06	0.05-0.06	0.06	0.01	-	-	-
ST 90	0.44-0.50	0.60-0.90	0.15-0.35	0.03	0.03	-	1.6-2	0.6-1	0.15-0.30

Tabel 2. Sifat-sifat mekanis piringan roda (ST60) dan piringan rel (ST90).

Properties	ST 60	ST 90
Yield Strength (MPa)	315-550	470
Tensile Strength (MPa)	570-710	745
Young Modulus (GPa)	200	190
Elongation (%)	8-25	22
Hardness (HRD)	31	39.4

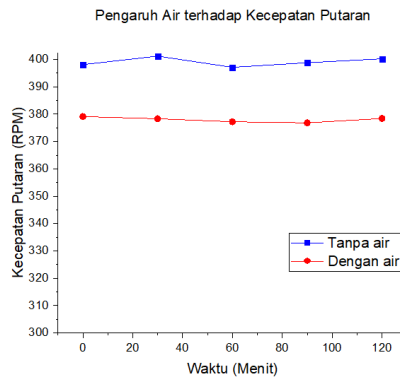


Gambar 2. Pasir yang digunakan dalam pengujian: mesh 80-200 (kiri), mesh 30-50 (tengah), dan mesh 20-30 (kanan).

3. Hasil dan pembahasan

3.1 Pengukuran kecepatan putaran dalam kondisi basah

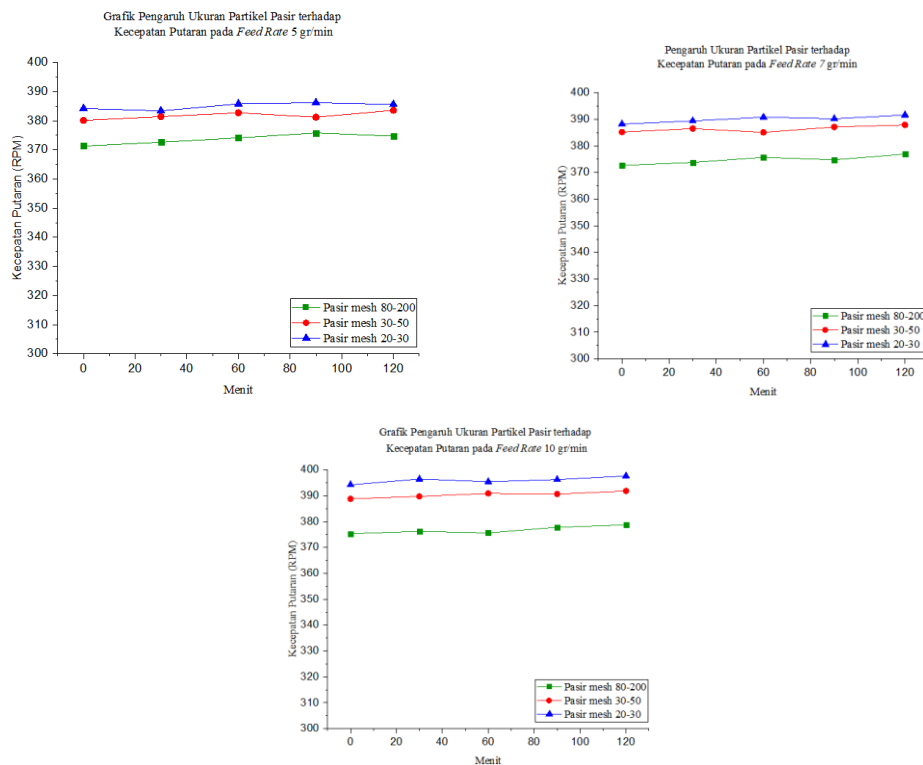
Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh air terhadap kecepatan putaran spesimen real serta menganalisis apakah terdapat perbedaan kecepatan putaran antara spesimen roda dan rel pada saat kering dan basah. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 3. Terlihat bahwa terdapat perbedaan kecepatan putaran piringan rel yang signifikan antara kondisi kering dan kondisi basah. Pada kecepatan putar roda spesimen 400 rpm, kecepatan putaran piringan rel pada kondisi basah lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan putaran piringan rel pada kondisi kering. Hal ini menunjukkan adanya slip ratio antara rel dan roda yang lebih besar pada kondisi basah.



Gambar 3. Grafik pengaruh air terhadap kecepatan putaran piringan spesimen rel

3.2 Pengukuran kecepatan putaran dengan variasi ukuran partikel

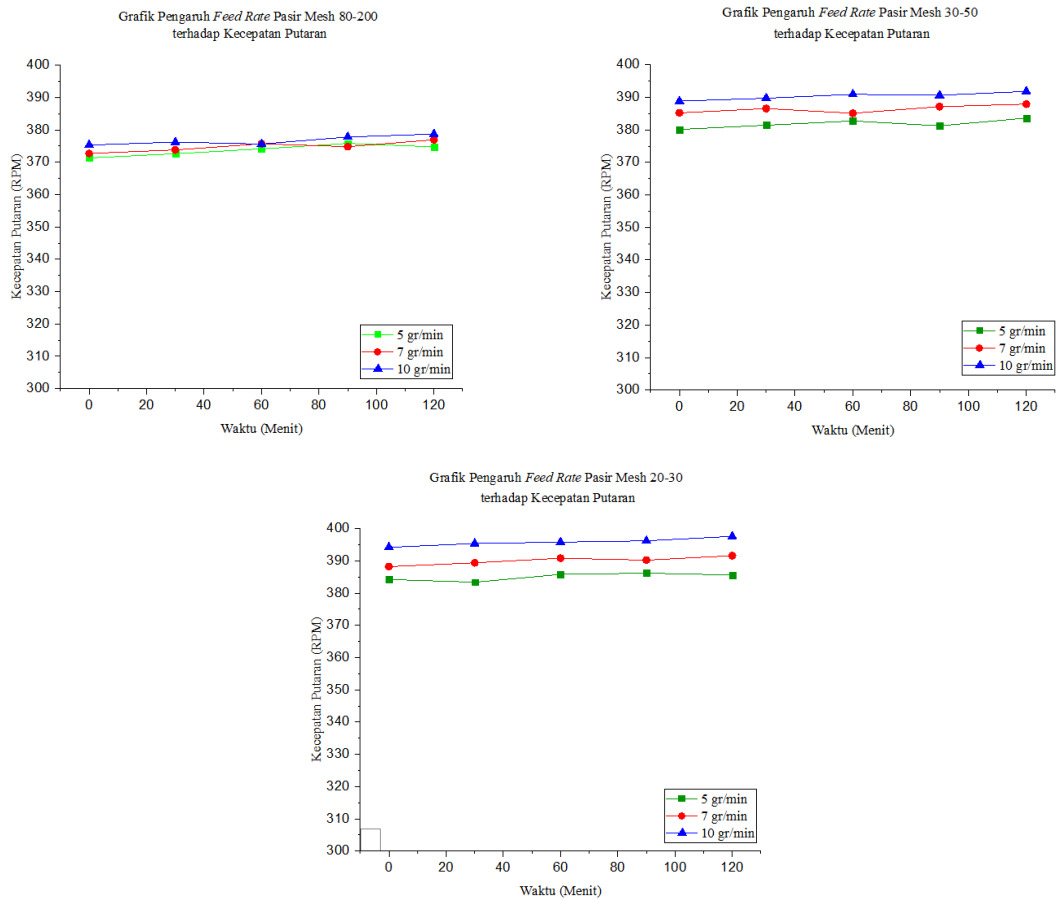
Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel pasir terhadap kecepatan putaran piringan rel dalam kondisi basah. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 4. Terlihat bahwa terdapat perbedaan kecepatan putaran piringan rel pada masing-masing ukuran partikel pasir. Semakin besar ukuran partikel pasir maka kecepatan putaran piringan rel akan semakin besar dan mendekati kecepatan putaran piringan roda.



Gambar 4. Grafik pengaruh ukuran partikel pasir terhadap kecepatan putaran piringan spesimen rel pada *feed rate* (a) 5 g/min, (b) 7 g/min, dan (c) 10 g/min.

3.3 Pengukuran kecepatan putaran dengan variasi *feed rate* pasir

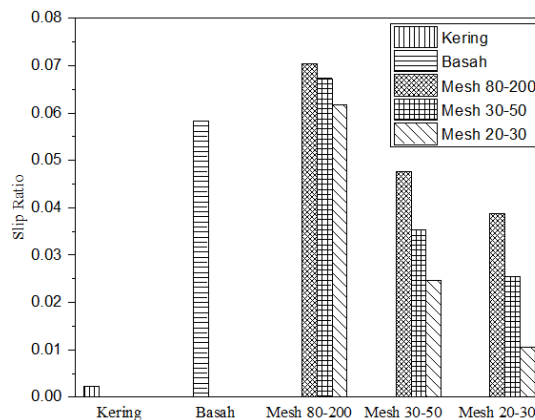
Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh *feed rate* pasir terhadap kecepatan putaran piringan rel dalam kondisi basah. Hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5. Terlihat bahwa terdapat perbedaan kecepatan putaran piringan rel pada masing-masing besar *feed rate* pasir. Semakin tinggi *feed rate* pasir maka kecepatan putaran piringan rel akan semakin besar dan mendekati kecepatan putaran piringan roda.



Gambar 5. Grafik pengaruh *feed rate* pasir terhadap kecepatan putaran piringan spesimen rel pada ukuran partikel pasir (a) mesh 80-200, (b) mesh 30-50, dan (c) mesh 20-30

3.4 Pengaruh ukuran partikel dan *feed rate* pasir terhadap *slip ratio*

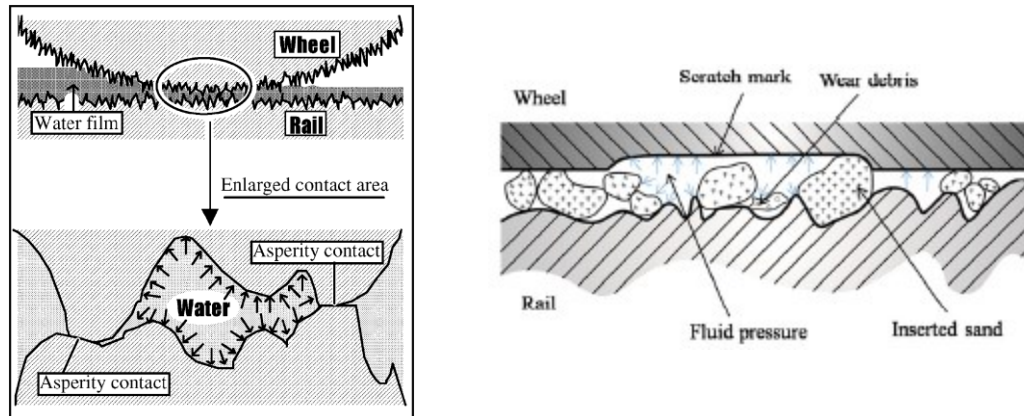
Setiap data kecepatan putaran pada pengukuran sebelumnya dihitung rata-ratanya untuk mendapatkan kecepatan putaran rata-rata pada tiap-tiap kondisi pengujian. Selanjutnya data kecepatan putaran rata-rata tersebut digunakan untuk menghitung besar *slip ratio* yang terjadi antara roda dan rel. Grafik pengaruh ukuran partikel terhadap *slip ratio* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik pengaruh ukuran partikel dan *feed rate* pasir terhadap *slip ratio*.

Dari perhitungan *slip ratio* didapatkan bahwa persentase perbandingan antara kecepatan sudut dan kecepatan transversal roda pada kondisi basah sebesar 5,83 %. Artinya gaya gesek antara roda dan rel berkurang dibandingkan dengan pada kondisi kering yang *slip ratio*-nya sebesar 0,23%, sehingga roda tidak dapat mencengkeram permukaan rel dengan baik dan membuat roda mengalami gerak bergulir dengan slip. Dari kedua hasil pengujian pada kondisi kering dan basah dapat dilihat bahwa air mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kecepatan transversal roda yang diwakilkan oleh kecepatan putaran spesimen rel.

Pada kondisi kering/tanpa air, beban yang diberikan pada roda menekan asperities dari roda ke permukaan rel dan asperities rel menekan permukaan roda. Saat roda mulai berputar, asperities roda akan menggeser asperities rel sehingga menghasilkan gaya gesek. Gaya gesek inilah yang membantu permukaan roda mencengkeram permukaan rel sehingga kecepatan sudut roda dan kecepatan transversalnya tidak terlalu berbeda jauh. Pada kondisi basah/dengan air, air yang diberikan menciptakan lapisan air yang tipis di atas permukaan roda dan rel. Lapisan air tersebut menghalangi asperities dari roda dan rel untuk mengunci satu sama lain. Akibatnya gaya gesek antara roda dan rel berkurang dan menyebabkan terjadinya fenomena slip pada roda.



Gambar 7. Lapisan air dan pasir yang terbentuk di atas permukaan roda dan rel mengisi ruang pada asperities [9].

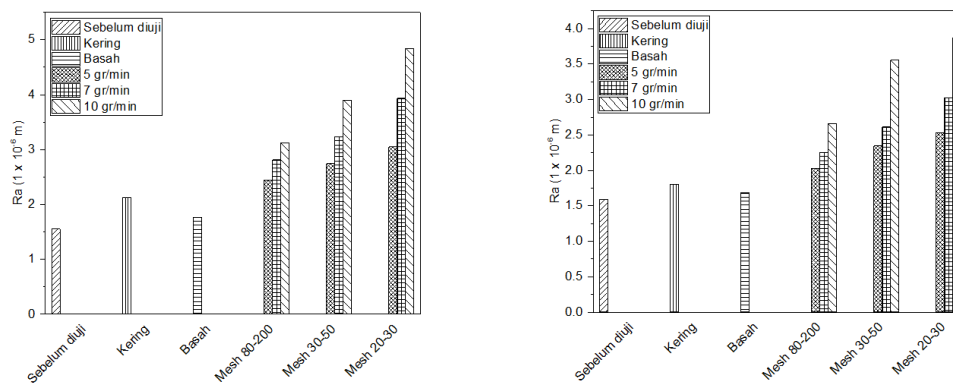
Pada saat diberikan pasir *mesh* 80-200, perbedaan kecepatan putaran roda dan rel lebih besar dibandingkan kondisi kering dan basah. Hal ini disebabkan oleh ukuran partikel pasir *mesh* 80-200 yang kecil atau halus dan memiliki struktur seperti bubuk atau debu. Sehingga saat pasir *mesh* 80-200 bercampur dengan air, mereka membentuk campuran seperti lumpur dan bertindak seperti pelumas padat di antara permukaan kedua spesimen. Akibatnya, gaya gesek pada permukaan kedua spesimen jadi semakin berkurang dan roda mengalami fenomena slip. Pada saat diberikan pasir *mesh* 30-50 perbedaan kecepatan putaran antara roda dan rel berkurang dibandingkan dengan saat kondisi basah. Artinya pasir *mesh* 30-50 mampu meningkatkan friksi lebih baik dibandingkan pasir *mesh* 80-200. Pada saat diberikan pasir *mesh* 20-30, perbedaan kecepatan putaran antara roda dan rel berkurang dibandingkan dengan saat kondisi basah ataupun pada saat pengujian dengan pasir *mesh* 30-50. Artinya pasir *mesh* 20-30 mampu meningkatkan friksi lebih baik dibandingkan pasir *mesh* 30-50.

Pada Gambar 7 dapat dilihat bahwa ukuran partikel pasir sangat mempengaruhi nilai *slip ratio* antara roda dan rel. Semakin besar ukuran partikel pasir, maka nilai *slip ratio* antara roda dan rel akan semakin menurun. Hal ini karena semakin besar ukuran partikel pasir, maka semakin luas lapisan air yang dihilangkan oleh pasir tersebut. Sehingga asperities dari roda dan rel tidak lagi terhalangi oleh lapisan air, melainkan digantikan oleh partikel pasir. Disitu juga terlihat bahwa semakin tinggi *feed rate* yang dipakai, maka nilai *slip ratio* antara roda dan rel juga akan semakin menurun. Hal ini terjadi karena semakin tinggi *feed rate*, maka partikel pasir yang akan menutupi piringan juga akan semakin banyak. Artinya semakin banyak juga partikel pasir yang akan menggantikan lapisan air pada permukaan roda dan rel.

3.4 Pengaruh ukuran partikel dan *feed rate* pasir terhadap kekasaran permukaan

Sebelum pengujian dengan alat uji, kekasaran permukaan (*Ra*) piringan roda sekitar 1,55 μm dan piringan rel sebesar 1,60 μm . Nilai ini hampir mendekati nilai kekasaran permukaan roda dan rel kereta api yang baru. Dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa kekasaran permukaan meningkat setelah dilakukan eksperimen dengan *twin disk roller rig* baik pada kondisi kering, basah, dan saat diberi pasir. Semakin besar ukuran partikel pasir, maka kekasaran permukaan piringan roda dan rel juga akan semakin meningkat. Dapat dilihat juga bahwa semakin tinggi *feed rate* pasir yang diberikan, maka kekasaran permukaan piringan roda dan relnya juga akan semakin meningkat. Hal lain yang bisa dilihat adalah peningkatan nilai kekasaran permukaan pada piringan roda terlihat lebih besar daripada piringan rel.

Peningkatan nilai kekasaran permukaan maksimal terjadi pada pengujian dengan ukuran partikel pasir yang paling besar. Hal ini disebabkan karena ukuran partikel pasir yang besar mempunyai sisi tajam yang lebih besar sehingga mampu mengikis permukaan spesimen lebih dalam. Pada grafik juga terlihat bahwa semakin tinggi *feed rate* yang digunakan, maka nilai kekasaran permukaan piringan roda dan piringan rel juga akan semakin meningkat. Hal ini terjadi karena semakin tinggi *feed rate* yang digunakan, maka semakin banyak juga partikel pasir yang akan masuk ke area kontak roda dan rel dan mengikis permukaan piringan roda dan piringan rel.



Gambar 8. Grafik perbandingan nilai kekasaran (Ra) permukaan piringan (a) roda dan (b) rel sebelum dan sesudah pengujian

Dari grafik pada Gambar 8 juga terlihat bahwa piringan roda memiliki peningkatan nilai kekasaran permukaan yang lebih besar dibandingkan piringan rel. Hal ini disebabkan karena piringan rel memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen roda. Menurut teori abrasi [10], asperity dari permukaan material yang keras akan menembus dan mengerosi permukaan material yang lebih lunak. Sehingga peningkatan nilai Ra dari roda tidak hanya karena pengikisan oleh pasir, tetapi juga karena asperity dari rel yang menembus roda. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pasir dapat menurunkan *slip ratio* antara roda dan rel pada saat kondisi basah, namun hal tersebut memiliki konsekuensi yaitu meningkatnya nilai kekasaran pada permukaan roda dan rel dan hal ini dapat memperpendek umur pakai dari roda dan rel.

5. Kesimpulan

- (1) Besar ukuran partikel pasir sangat mempengaruhi perbedaan kecepatan putaran antara roda dan rel. Semakin besar ukuran partikel pasir, maka perbedaan kecepatan putaran dan *slip ratio*-nya akan semakin kecil.
- (2) Tinggi nilai *feed rate* sangat mempengaruhi perbedaan kecepatan putaran antara roda dan rel. Semakin besar tinggi *feed rate* yang dipakai, maka perbedaan kecepatan putaran dan *slip ratio*-nya akan semakin kecil.
- (3) Ukuran dan *feed rate* pasir yang paling baik dalam mengurangi *slip ratio* antara roda dan rel adalah pasir mesh 20-30 dengan ukuran partikel 0,595-0,841 mm pada *feed rate* 10 gram/min. Pasir ini dapat mengurangi *slip ratio* antara roda dan rel sampai 1,05%.
- (4) Ukuran pasir yang terlalu kecil akan semakin memperburuk kondisi slip. Hal ini terlihat pada pengujian dengan pasir S yang justru meningkatkan nilai *slip ratio* antara roda dan rel sampai 6,18% - 7,04%.
- (5) Besar ukuran partikel dan *feed rate* pasir sangat mempengaruhi nilai kekasaran permukaan (Ra) roda dan rel. Semakin besar ukuran partikel dan *feed rate* pasir, maka nilai Ra yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Nilai Ra tertinggi dihasilkan oleh pengujian dengan pasir mesh 20-30 pada *feed rate* 10 gram/min dengan nilai Ra sebesar 4,84 μm untuk piringan roda dan 3,87 μm untuk piringan rel.

Daftar Pustaka

- [1] Voges, W., Spiess, P., 2006, "Optimizing Services with EMU ET42x in Autumn 2004 and 2005", *In proceedings of 7th World Congress on Railway Research*, Canada.
- [2] Arias-Cuevas, O., Li, Z., 2010, "Field Investigations on Rolling Stock Components Designed to Overcome Low Adhesion Related Problems," *Joint Rail Conference*, 2, pp.203-212.
- [3] Günay, M., Korkmaz, M.E., Özmen, R., 2020, "An investigation on braking systems used in railway vehicles" *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 23, Issue 2, pp. 421-431.
- [4] Andrews, H.I., 2010, "Railway Traction—the Principles of Mechanical and Electrical Railway Traction," Elsevier.
- [5] Ferri, V., "Sanding control system for railway vehicles" US Patent US5428538A, 1991.
- [6] Skipper, W., Chalisey, A., Lewis, R., (2018) A review of railway sanding system research: adhesion restoration and leaf layer removal, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 12:4, 237-251.
- [7] Lewis, R., dan Masing, J., 2006, "Static Wheel/Rail Contact Isolation due to Track Contamination," *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Part F, 220(1), pp. 43–53.
- [8] Lewis, R., Dwyer-Joyce, R.S., 2006, "Wear at the wheel/rail interface when sanding is used to increase adhesion" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 220(1):29-41.
- [9] Kalpakjian, S., Schmid S.R., 2008, "Manufacturing Engineering and Technology," 6th ed, New York: Prentice Hall.
- [10] Chen, H., Ban, T., Ishida, M., & Nakahara, T., 2002, "Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact," *Wear*, 253(1-2), pp. 75–81.