

## PENGARUH TEBAL RODA KERETA TERHADAP RASIO SLIP, KONSUMSI DAYA, PERUBAHAN MASSA DAN KEKASARAN PERMUKAAN

\*Ahmad Alwin<sup>1</sup>, Paryanto<sup>2</sup>, Rusnaldy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. H. Soedarto, SH, Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*Email: [ahmadalwin@students.undip.ac.id](mailto:ahmadalwin@students.undip.ac.id)

### Abstrak

Fenomena slip merupakan salah satu fenomena yang sering terjadi pada perjalanan kereta api yang dapat menghambat maupun membahayakan perjalanan kereta api. Slip terjadi ketika gaya traksi roda tidak sebanding dengan gaya adhesi roda kereta. Pada penelitian bertujuan untuk mengetahui efek geometri tebal roda kereta api terhadap fenomena slip, konsumsi daya yang digunakan, perubahan massa yang dihasilkan dan perubahan nilai kekasaran permukaan yang dihasilkan. Pada eksperimen ini, pengujian untuk meneliti pengaruh tebal roda kereta api dengan rel digunakan alat bernama *twin disk roller rig*. Variasi yang digunakan untuk eksperimen ini adalah variasi tebal roda kereta dan penggunaan laju aliran air yaitu tanpa air dan 10 ml/menit. Hasilnya didapati bahwa pengaruh tebal kontak roda dengan rel kereta api mempengaruhi rasio slip, daya serta laju perubahan massa. Semakin besar kontak area, maka semakin besar rasio slip yang dihasilkan, daya yang digunakan dan perubahan massa yang terjadi. Namun, pada perubahan kekasaran permukaan efek tebal kontak roda dengan rel tidak memiliki pengaruh yang signifikan. Selain pengaruh tebal roda, kenaikan daya listrik yang digunakan, perubahan massa dan perubahan kekasaran permukaan juga dipengaruhi oleh efek kombinasi rasio slip yang dihasilkan roda dengan pengaruh lubrikasi air. Pada sampel yang sama dengan tebal berbeda, efek dari lubrikasi air dapat memperbesar rasio slip kemudian menaikkan daya listrik, mempercepat perubahan massa, dan mempercepat pengurangan nilai kekasaran permukaan roda

**Kata kunci :** daya listrik; kekasaran permukaan; perubahan massa; rasio slip; tebal roda

### Abstract

*Slip phenomenon is a condition that often occurs in train which can hinder and endanger train trip. Slip phenomenon occurs when the train wheel traction force of the wheel is not proportional to the adhesion force. This experiment goals was to examine the effect of train wheel thickness on slip ratio, power consumption, wheel mass reduction and wheel surface roughness reduction. In this experiment, a twin disk roller rig device used to examine the effect of the thickness of the train wheels. The variation of train wheel thickness used in this experiment were 6 mm, 8 mm and 10 mm. In addition, this experiment also worked in dry and wet condition with water flow 10 ml/min. The result of the experiment shows that the influence of the thickness of wheel contact with the rail affected the slip ratio, power used and the rate of reduction of wheel mass. The larger of contact area, the greater slip ratio occurred, higher power used and the reduction in mass occurred. However, the effect of the contact area of the wheel with the rail had no significant effect on surface roughness of reduction. In addition to the effect of wheel thickness, the increased of electric power used, mass reduction and surface roughness were affected by both effect of the slip ratio produced by the wheels with the effect of water lubrication. With same thickness, the effect of water lubrication increased the slip ratio, electric power consumption, mass reduction, and reduction of wheel roughness value.*

**Keywords :** electric power; mass reduction; slip ratio; surface roughness; wheel thickness

### 1. Pendahuluan

Slip merupakan suatu kondisi dimana roda berotasi dengan kecepatan tertentu namun tidak disertai perpindahan yang sesuai. Fenomena slip pada kereta api terjadi akibat besarnya gaya traksi kereta api (*tractive effort*) yang tidak menurun akibat berkurangnya gaya adhesi antara roda dan rel [1]. Fenomena slip pada kereta api ditandai dengan berkurangnya kecepatan pada kereta api, sedangkan roda dan motor traksi kereta telah mengeluarkan daya yang lebih besar. Kondisi slip pada awalnya hanya akan menghambat laju perjalanan kereta api, namun jika kondisi slip terjadi terus menerus maka fenomena slip akan menimbulkan kerusakan pada roda dan rel kereta, terjadinya *wheel flats*, *microcracks*, timbulnya suara getaran roda, dan mempercepat keausan pada roda kereta.

Metode konvensional menangani kondisi slip adalah dengan menabur pasir atau dikenal dengan istilah *sanding*. Penggunaan partikel pasir dilakukan guna meningkatkan gaya adhesi rel. *Sanding* bekerja dengan cara meningkatkan adhesi pada roda kereta dan rel yang terkontaminasi oleh lubrikan [2]. Pada perjalanan kereta api terdapat alat untuk mengalirkan pasir ke rel kereta yang basah namun hanya lokomotif yang dilengkapi alat pemasir atau *sandbox*.

Guna meningkatkan keamanan dan kenyamanan perjalanan kereta api maka perlu upaya alternatif lain selain menggunakan pasir untuk meminimalisir terjadinya slip yang menyebabkan kerusakan pada roda kereta api. Penggunaan pasir dalam meningkatkan adhesi pada roda dan rel kereta selain berdampak baik pada perjalanan kereta api juga berdampak buruk pada komponen perkeretaapian. Butiran pasir yang digunakan pada proses *sanding* dapat membentuk lapisan insulasi elektrik yang dapat merusak komponen alat sensor pendeteksi kereta. Selain itu, penggunaan pasir juga dapat mempercepat laju keausan baik pada roda kereta maupun rel kereta [2]. Laju keausan roda kereta saat penggunaan pasir dapat meningkat 30 kali daripada kondisi tanpa pasir [3].

Upaya lainnya yang dapat dilakukan adalah dengan memanfaatkan fenomena adhesi pada bidang sentuh kereta dengan rel yaitu roda kereta api. Menurut Zhang ada tiga hal yang mempengaruhi peningkatan gaya adhesi antara roda kereta api dengan rel kereta yaitu kecepatan kereta api, beban kereta api dan yang paling utama adalah bentuk roda ataupun rel kereta api [4]. Selain tahan terhadap slip, desain roda juga harus berpengaruh terhadap performa dalam perkeretaapian, seperti konsumsi energi yang minim, aman, efisien pemakaiannya, ekonomis dari segi perawatannya, dan memiliki ketahanan yang baik [5]. Hal ini dikarenakan pada transportasi kereta api, biaya perawatan terbesar ada pada biaya perawatan seperti pergantian roda dan rel kereta api akibat fenomena adhesi, termasuk kondisi *stick* - slip [6]. *Swedish National Railway* pada tahun 2003 telah menghabiskan dana sebesar 90 juta *Euro* pada biaya operasional akibat fenomena adhesi pada interaksi roda dan rel kereta sedangkan *British Railway*, mengalami masalah yang sama yaitu fenomena buruknya adhesi dan telah menghabiskan 60 juta *Euro* [7].

Berdasarkan penjabaran tersebut, penelitian ini ditujukan untuk mengamati hubungan antara geometri tebal area kontak roda dengan rel dalam kondisi basah maupun kering dan pengaruhnya terhadap performa roda kereta api pada permodelan lintasan lurus. Eksperimen dilakukan dengan alat *twin disk roller rig* dengan parameter uji adalah tebal sampel roda kereta.

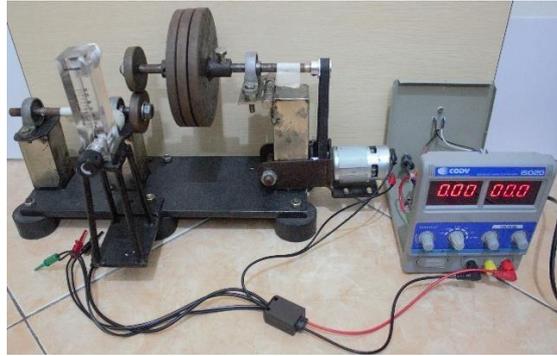
## 2. Metodologi penelitian

Pada eksperimen ini, untuk mengetahui performa kontak roda kereta digunakan alat *twin disk roller rig* (gambar 1). Alat ini merupakan alat sederhana yang digunakan untuk mengetahui performa dari roda kereta. Alat ini sebelumnya digunakan pada eksperimen yang berjudul "*Pengaruh Ukuran Partikel dan Feed Rate Pasir pada Sistem Sanding Kereta Api terhadap Kecepatan Putaran dan Kekasaran Permukaan Roda dan Rel*". Alat *twin disk roller rig* bekerja dengan memanfaatkan gaya gesek yang terjadi antara spesimen sampel roda dan sampel rel [8]. Efek gesekan sampel roda dan rel serta parameter yang mempengaruhi dalam proses dan hasilnya akan menjadi data yang diukur. Data dalam proses perputaran roda merupakan data seperti tegangan listrik yang digunakan, rasio slip yang

Variabel uji merupakan sesuatu hal yang diperlakukan terhadap benda uji dengan terukur. Pada penelitian ini, variabel uji yang digunakan adalah variabel laju aliran air dan ketebalan bidang sampel roda kereta dengan rel. Pada eksperimen ini digunakan 3 sampel roda dengan tebal area sentuh berbeda, sedangkan sampel rel hanya memiliki 1 variasi tebal area sentuh. Sampel roda pada eksperimen ini terbuat dari material ST60 sedangkan sampel rel terbuat dari material baja ST90 komposisi dan sifat mekanis dari material ST60 dan ST90 dapat dilihat pada tabel 1 dan 2. Sampel roda maupun sampel rel dibuat dengan proses permesinan. Desain sampel roda dan rel dapat dilihat pada tabel 3, sedangkan hasil dari proses permesinan dapat dilihat pada tabel 4.

Pada eksperimen ini, untuk mengetahui performa kontak roda kereta digunakan alat *twin disk roller rig* (gambar 1). Alat ini merupakan alat sederhana yang digunakan untuk mengetahui performa dari roda kereta. Alat ini sebelumnya digunakan pada eksperimen yang berjudul "*Pengaruh Ukuran Partikel dan Feed Rate Pasir pada Sistem Sanding Kereta Api terhadap Kecepatan Putaran dan Kekasaran Permukaan Roda dan Rel*". Alat *twin disk roller rig* bekerja dengan memanfaatkan gaya gesek yang terjadi antara spesimen sampel roda dan sampel rel [8]. Efek gesekan sampel roda dan rel serta parameter yang mempengaruhi dalam proses dan hasilnya akan menjadi data yang diukur. Data dalam proses perputaran roda merupakan data seperti tegangan listrik yang digunakan, rasio slip yang

Variabel uji merupakan sesuatu hal yang diperlakukan terhadap benda uji dengan terukur. Pada penelitian ini, variabel uji yang digunakan adalah variabel laju aliran air dan ketebalan bidang sampel roda kereta dengan rel. Pada eksperimen ini digunakan 3 sampel roda dengan tebal area sentuh berbeda, sedangkan sampel rel hanya memiliki 1 variasi tebal area sentuh. Sampel roda pada eksperimen ini terbuat dari material ST60 sedangkan sampel rel terbuat dari material baja ST90 komposisi dan sifat mekanis dari material ST60 dan ST90 dapat dilihat pada tabel 1 dan 2. Sampel roda maupun sampel rel dibuat dengan proses permesinan. Desain sampel roda dan rel dapat dilihat pada tabel 3, sedangkan hasil dari proses permesinan dapat dilihat pada tabel 4.



Gambar 1. Alat twin disk roller rig

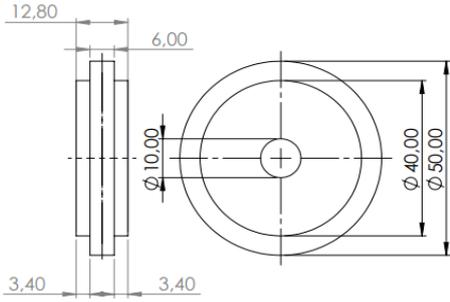
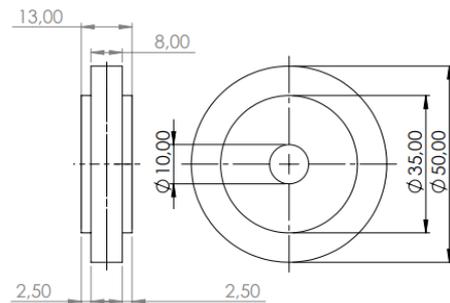
Tabel 1. Komposisi kimia bahan sampel uji

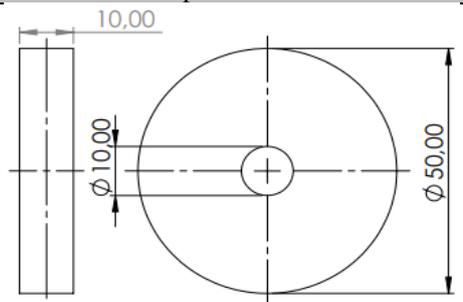
Material	Komposisi (wt%)				
	C	Mn	Si	S	P
ST 60	0,44 - 0,50	0,50 – 0,80	0,15 – 0,35	0,03	0,03
ST 90	≤ 0,7	≤ 1,3	≤ 0,7	0,035	0,035

Tabel 2. Sifat fisik bahan sampel uji

Material	Sifat Fisik				
	Kekuatan Luluh (Yield Strength)	Kekuatan Tarik (Tensile Strength)	Modulus Young (Young Modulus)	Perubahan Panjang (Elongation)	Kekerasan (Hardness)
ST 60	315 – 550 MPa	570 – 710 MPa	200 GPa	8 – 25 %	31 HRD
ST 90	470 MPa	745 MPa	190 GPa	22 %	49.4 HRD

Tabel 3. Desain sampel roda

Sampel	Spesifikasi
Dimensi Sampel uji roda 6 mm	
Dimensi sampel uji roda 8 mm	

Sampel	Spesifikasi
Dimensi sampel uji roda 10 mm & sampel rel	

**Tabel 4.** Sampel uji hasil proses permesinan

Sampel Uji	Gambar
Sampel uji 6 mm	
Sampel uji 8 mm	
Sampel uji 10 mm & sampel rel	

Tahap pengujian merupakan tahap yang dilakukan untuk menguji benda uji terhadap variabel uji yang digunakan. Pada pengujian menggunakan *twin disk roller rig*, untuk menjawab dari tujuan penelitian. Tiap sampel roda dan rel akan dilakukan pengujian putaran dengan kecepatan konstan selama 50 menit baik dengan air dan tanpa air. Adapun tahap pengumpulan data yaitu pengumpulan data rasio slip, daya listrik yang digunakan, perubahan massa akibat gesekan antar sampel dan perubahan nilai kekasaran permukaan.

Selama pemutaran selama 50 menit, data yang diukur yaitu data kecepatan putaran dari sampel roda diukur dengan alat *laser tachometer*. Data nilai rasio slip diukur dengan mengarahkan sinar laser kearah *reflective tape* yang terpasang pada poros sampel roda dan sampel rel. kemudian nilai rasio slip dihitung dengan persamaan berikut;

$$\text{Rasio Slip } (\lambda) = \frac{V_w - V_{rel}}{V_w} = \frac{\omega_w r_w - \omega_{rel} r_{rel}}{\omega_w r_w} \times 100\% \quad (1)$$

Dengan;

- $V_s$ : Kecepatan Slip
- $V_w$ : Kecepatan translasi roda
- $V_{rel}$ : Kecepatan translasi rel
- $\omega_w$ : Kecepatan rotasi roda
- $\omega_{rel}$ : Kecepatan rotasi rel
- $\lambda$  : Rasio Slip
- $r_{rw}$ : Jari - jari roda
- $r_{rel}$ : Jari - jari rel

Selain rasio slip, data yang diukur lainnya yaitu data daya listrik yang digunakan pada *motor dc*. Daya *motor dc* diukur dengan mengukur nilai arus listrik terukur dan nilai tegangan terukur pada *display power supply*. Kemudian data diolah untuk mencari daya listrik yang digunakan dengan rumus 2 berikut;

$$\text{Daya Listrik } (P) = V \times I \quad (2)$$

Dengan;

- $P$ : Daya Listrik
- $I$ : Kuat Arus Listrik
- $V$ : Tegangan Listrik

Setelah sampel mengalami proses pemutaran selama total 50 menit, kemudian sampel akan ditimbang massanya menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,1 miligram. Pada penelitian ini, perubahan massa diibaratkan sebagai keausan karena menurut Blau (1997) keausan merupakan lepasnya bagian material dari permukaan padatan atau pengurangan kuantitas yang terjadi ketika dua material saling bergesekan dan bergerak relatif terhadap benda lainnya [9]. Pada eksperimen ini, rumus pengurangan massa untuk mengetahui perubahan massa akibat gesekan dirumuskan yaitu;

$$\Delta w = w_1 - w_2 \quad (3)$$

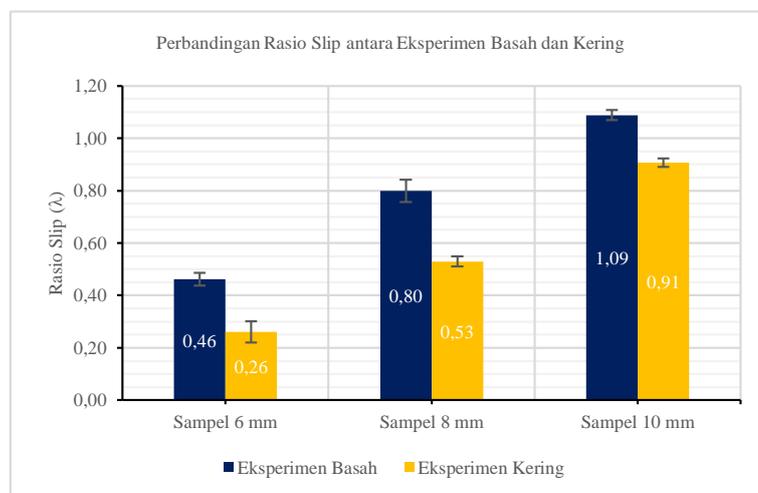
Dengan;

- $\Delta w$ : Perubahan massa
- $w_1$ : Berat Sebelum pengujian (mg)
- $w_2$ : Berat Setelah pengujian (mg)

Dalam rangkaian penelitian, pengukuran terakhir selama siklus pengujian adalah pengukuran kekasaran permukaan sampel roda. Pengukuran nilai kekasaran permukaan sampel roda pada eksperimen ini menggunakan alat *surface roughness tester* (TIME 3221). Pengukuran kekasaran permukaan sampel dilakukan pada 3 area yang berdekatan. Setiap area diukur sebanyak tiga kali. Kemudian data kekasaran permukaan dirata – ratakan untuk diketahui nilai kekasaran rata – rata roda.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Pengaruh Perbedaan Geometri Tebal Sampel Roda terhadap Rasio Slip dalam Kondisi Kering dan Basah



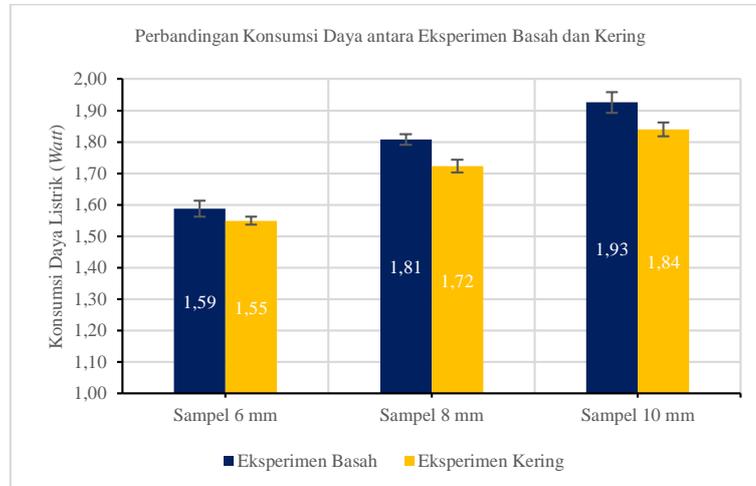
**Gambar 2.** Grafik rasio slip tiap sampel kondisi basah dan kering

Hasil dari eksperimen kering dan basah, dapat dikatakan bahwa kehadiran lapisan air dan pengaruh perbedaan ketebalan dapat mempengaruhi konsumsi daya pada seluruh sampel. Sampel – sampel ini mengalami kenaikan konsumsi daya kurang lebih 0,03 sampai 0,04 *watt* pada sampel dengan tebal 6 milimeter, kenaikan 0,05 sampai 0,1 *watt* pada sampel dengan tebal 8 milimeter dan 0,07 sampai 0,1 *watt* pada sampel dengan tebal 10 milimeter ketika diuji dengan

eksperimen basah. Pada eksperimen baik kering maupun basah, sampel roda dengan tebal area kontak 6 mm, memiliki kenaikan konsumsi daya paling kecil baik dalam kondisi kering dan basah.

### 3.2 Pengaruh Perbedaan Geometri Tebal Sampel Roda terhadap Konsumsi Daya dalam Kondisi Kering dan Basah

Hasil dari eksperimen kering dan basah, dapat dikatakan bahwa kehadiran lapisan fluida air dapat meningkatkan nilai rasio slip tiap sampel walaupun nilai rasio slip cenderung fluktuatif. Penggunaan fluida air pada eksperimen basah dapat mengurangi gesekan yang terjadi antara kontak antara sampel roda dan rel. Pada eksperimen baik kering maupun basah, sampel roda dengan tebal area kontak 6 mm, memiliki ketahanan terhadap fenomena slip yang paling kecil dibandingkan sampel lainnya.

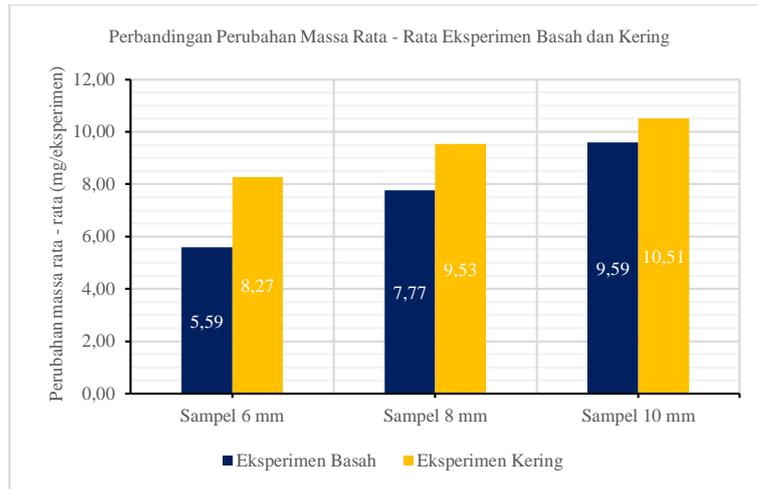


Gambar 3. Grafik konsumsi daya tiap sampel kondisi basah dan kering

Fenomena slip bergantung pada gaya gesek yang dihasilkan. Semakin kecil gaya gesek (koefisien traksi) yang dihasilkan maka rasio slip yang dihasilkan akan semakin besar [10]. Salah satu faktor yang mempengaruhi gaya gesek adalah efek kontak area sentuh, baik dari diameter roda maupun tebal roda. Tebal kontak area dapat mempengaruhi perbedaan tekanan roda, semakin besar tebal area kontak maka semakin kecil tekanan kontak [11], [12]. Tekanan kontak yang mengecil akan memperkecil gaya adhesi antara roda dan rel sehingga fenomena slip semakin besar. Selain area kontak, faktor lainnya pengaruh menurunnya adhesi adalah penggunaan pelumasan seperti air maupun oli [13].

### 3.3 Pengaruh Perbedaan Geometri Tebal Sampel Roda terhadap Nilai Perubahan Massa Kondisi Kering dan Basah

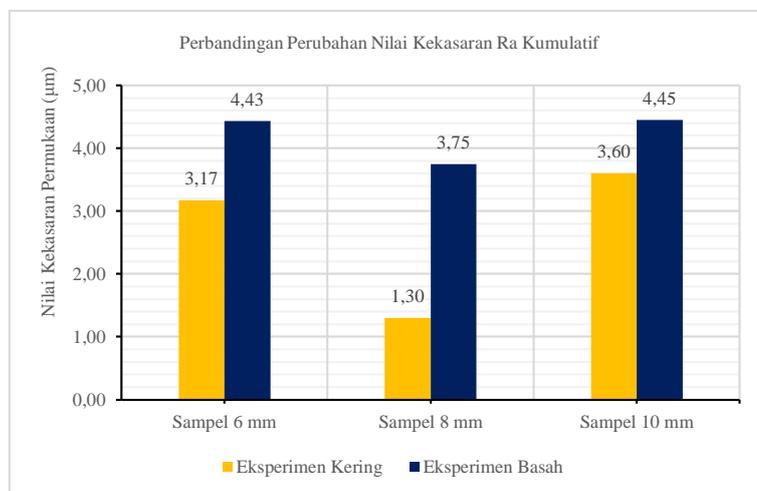
Dari hasil eksperimen, didapati bahwa pengaruh tebal roda berpengaruh terhadap perubahan massa. Semakin besar kontak area antara roda dan rel kereta, maka semakin besar laju perubahan massa roda [14]. Selain pengaruh tebal roda, jika dibandingkan dengan sampel dengan pengujian kering, nilai perubahan massa pada kondisi kering tiap sampel lebih besar dibanding sampel dengan tebal yang sama pada kondisi basah. Hal ini disebabkan karena penggunaan air dapat memperkecil laju pengurangan massa [15]. Perbedaan laju perubahan massa uji kering dan uji basah diakibatkan adanya lapisan alami yaitu oksida-besi (iron oxide). Pada eksperimen uji kering, lapisan iron oxide lebih cepat menghilang dibandingkan kondisi basah. Lapisan iron oxide pada kondisi uji basah dapat mengurangi efek sentuhan langsung antar sampel uji, sehingga gesekan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan kondisi basah [16].



**Gambar 4.** Grafik perbandingan perubahan massa rata - rata tiap sampel baik dalam kondisi basah dan kering

Selain adanya lapisan iron oxide, faktor lainnya yang berpengaruh yaitu rasio slip. Rasio slip yang dihasilkan mempengaruhi laju pengurangan massa rata – rata karena semakin besar rasio slip maka semakin cepat tegangan geser yang terdistribusi, sehingga material akan mengalami percepatan deformasi, akibat hal ini material akan cepat melewati regangan kritisnya [17].

### 3.4 Pengaruh Perbedaan Geometri Tebal Sampel Roda terhadap Perubahan Nilai Kekasaran Permukaan yang Dihasilkan



**Gambar 5.** Grafik perbandingan perubahan nilai kumulatif kekasaran permukaan parameter Ra

Pengaruh geometri tebal roda pada perubahan kekasaran permukaan sampel roda pada eksperimen ini tidak memiliki pengaruh signifikan. Semua sampel memiliki penurunan nilai Ra baik penurunan tertinggi, rata – rata dan kumulatif yang saling mendekati pada semua sampel baik pada eksperimen kering maupun basah. Efek dari pengaruh fenomena slip terhadap perubahan kekasaran permukaan telah dilakukan oleh Chen dan Ishida. Dengan kondisi uji spesimen dengan tebal yang sama, total putaran yang hampir sama namun dengan nilai slip yang berbeda, hasil dari eksperimen yang didapatkan yaitu slip mempengaruhi penurunan nilai kekasaran. Semakin besar nilai rasio slip, maka penurunan nilai kekasaran permukaan semakin cepat [18].

## 4. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh antara geometri tebal sampel roda dengan rel dalam kondisi basah maupun kering, dapat disimpulkan yaitu;

1. Geometri tebal sampel roda mempengaruhi perbedaan kecepatan putaran antara roda dan rel, baik dalam kondisi kering dan basah. Kecepatan putaran dan rasio slip yang dihasilkan akan semakin membesar ketika tebal roda semakin besar. Kenaikan rasio slip berkisar antara 0,1 % sampai 0,4%. Selain itu, faktor adanya fluida air yang mengalir pada putaran antara sampel roda dan rel sebesar 10 ml/menit pada kondisi basah meningkatkan nilai

rasio slip. Rasio slip pada kondisi basah mengalami peningkatan sebesar 0,1 sampai 0,2 % dari kondisi uji kering baik pada sampel dengan tebal 6, 8 dan 10 milimeter.

2. Tebal roda mempengaruhi perbedaan daya yang digunakan untuk memutar roda dan rel, baik dalam kondisi kering dan basah. Daya yang digunakan akan mengalami kenaikan sebesar 0,1 sampai 0,15 *watt* ketika tebal roda semakin besar. Selain itu, kenaikan daya juga dipengaruhi dengan perbedaan nilai rasio slip dan fluida air. Daya listrik yang digunakan mengalami kenaikan, namun lebih kecil dibandingkan kenaikan daya karena pengaruh tebal roda. Kenaikan daya yang berasal dari pengaruh air berkisar pada 0,07 sampai 0,1 *watt*.
3. Tebal roda mempengaruhi perubahan massa yang terjadi akibat gesekan untuk memutar roda dan rel, baik dalam kondisi kering dan basah. Hasil dari eksperimen baik kering dan basah sampel dengan tebal roda 6, 8 dan 10 milimeter didapati bahwa semakin kecil tebal roda, maka semakin kecil perubahan massa yang terjadi. Selain tebal, pengaruh perubahan massa juga dipengaruhi oleh faktor rasio slip yang dihasilkan dan adanya fluida air. Jika dibandingkan dengan kondisi basah, deviasi pengurangan massa secara kumulatif akibat gesekan antara sampel roda dan rel lebih kecil dibandingkan eksperimen tanpa air. Hal ini dikarenakan dengan adanya air pada eksperimen basah dapat mengurangi gesekan antara sampel roda dan rel.
4. Semua sampel roda mengalami penurunan kekasaran permukaan, baik dalam eksperimen kering maupun basah. Pada eksperimen ini, tidak ada pengaruh yang signifikan sebagai efek tebal sampel roda terhadap perubahan kekasaran permukaan rata – rata ( $R_a$ ) jika dibandingkan antar sampel pada kondisi kering dan basah. Namun, pada sampel dengan tebal yang sama dengan eksperimen perlakuan berbeda (kering dan basah), didapati perubahan kekasaran permukaan kumulatif yang cenderung lebih cepat pada kondisi basah dibandingkan kondisi kering. Hal ini diakibatkan oleh adanya kenaikan rasio slip akibat eksperimen pada sampel dengan tebal yang sama namun dengan perlakuan berbeda.

## 5. Referensi

- [1] Cao, X., Wen, Z., Qiyue, L., & Zhu, M. (2016). A Subscale Experimental Investigation on the Influence of Sanding on Adhesion and Rolling Contact Fatigue of Wheel / Rail Under Water Condition. *Journal of Tribology*, March.
- [2] Omasta, M., Machatka, M., Smej-, D., Hartl, M., & Ivan, K. (2014). Author ' s Accepted Manuscript. *International Journal on the Science and Techonlogy of Friction Lubrication and Wear*.
- [3] Faccoli, M., Petrogalli, C., Lancini, M., Ghidini, A., & Mazzù, A. (2018). Effect of desert sand on wear and rolling contact fatigue behaviour of various railway wheel steels. *Wear*, 396–397, 146–161.
- [4] Zhang, W., Chen, J., Wu, X., & Jin, X. (2002). Wheel / rail adhesion and analysis by using full scale roller rig. 253, 82–88.
- [5] Magel, E., & Kalousek, J. (2017). Designing and assessing wheel / rail profiles for improved rolling contact fatigue and wear performance. *Journal of Rail And Rapid Transit*, 231(7), 805–818.
- [6] Zhu, Y. (2013). *Adhesion in the wheel – rail contact*. Royal Institute of Technology
- [7] Olofsson, ulf. (2009). Adhesion and friction modification. In *Wheel-Rail Interface Handbook*. Woodhead Publishing Limited.
- [8] Myamlin, S., Kalivoda, J., & Neduzha, L. (2017). Testing of Railway Vehicles Using Roller Rigs. *Procedia Engineering*, 187, 688–695.
- [9] Blau, P. J. (1997). Fifty years of research on the wear of metals. *Tribology International*, 30(5), 321–331.
- [10] Lewis, S. R., & Dwyer-Joyce, R. S. (2009). Effect of contaminants on wear, fatigue and traction. In *Wheel-Rail Interface Handbook*. Woodhead Publishing Limited
- [11] Srivastava, J. P., Sarkar, P. K., & Ranjan, V. (2014). Contact Stress Analysis in Wheel–Rail by Hertzian Method and Finite Element Method. *Journal of The Institution of Engineers (India)*
- [12] Soemantri, S., Puja, W., Budiwanto, B., Parwata, M., & Schipper, D. J. (2010). Solution to Hertzian Contact Problem between Wheel and Rail for Small Radius of Curvature. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*,
- [13] Wang, W. J., Wang, H., Wang, H. Y., Guo, J., Liu, Q. Y., Zhu, M. H., & Jin, X. S. (2013). Sub-scale simulation and measurement of railroad wheel/rail adhesion under dry and wet conditions. *Wear*, 302(1–2), 1461–1467.
- [14] Blau, P. J. (1997). Fifty years of research on the wear of metals. *Tribology International*, 30(5), 321–331.
- [15] Wang, W. J., Lewis, S. R., Lewis, R., Beagles, A., He, C. G., & Liu, Q. Y. (2017). The role of slip ratio in rolling contact fatigue of rail materials under wet conditions. *Wear*, 376–377(December),
- [16] Zhu, Y., Yang, H., & Wang, W. (2016). Twin-disc tests of iron oxides in dry and wet wheelâ rail contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(4), 1066–1076.
- [17] Simbolon, R. H. (2014). PENGARUH HIGH SLIP-ROLL RATIO TERHADAP KEAUSAN BAJA AISI 1065. 1(1), 61–66.
- [18] Chen, H., & Ishida, M. (2006). Influence of surface roughness of rail formed by rail grinding on rolling contact fatigue.