

## PENGARUH PELUMASAN TERHADAP DEFORMASI PLASTIS PADA KONTAK DUA BENDA

**Bambang S  
Hardjuno**

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik  
Negeri Semarang  
Jln. Prof. Sudarto S.H.  
Tembalang, Semarang 50061

**Joga.D. Setiawan  
R. Ismail  
J. Jamari**

Jurusan Teknik Mesin Universitas  
Diponegoro, Semarang  
Jln. Prof. Sudarto S.H.  
Tembalang, Semarang 50275  
E-mail: [Sighh22@yahoo.com](mailto:Sighh22@yahoo.com)

*Running-in* adalah suatu cara yang efektif untuk penyesuaian kontak dua komponen dalam situasi fungsional rolling dan atau sliding. Ada banyak perubahan parameter selama *running-in*, kimiawi atau mekanis. Namun, perubahan geometri-mikro karena keausan atau deformasi plastis dominan. Ketika dua permukaan benda padat saling menekan selalu akan terjadi deformasi kontak. Sebagai konsekuensi alami suatu interaksi dua permukaan yang saling bergerak relative akan berlangsung gesekan dan keausan antar muka. Gesekan dan keausan bukanlah sifat material, tetapi sifat sistem, tergantung material yang digunakan dan kondisi pengoperasian.

Paper ini membahas deformasi plastis pada kontak dua benda kaitannya dengan pengaruh kondisi tanpa pelumasan dan menggunakan pelumas. Dalam penelitian ini menggunakan 7 macam rasio radius benda kontak dan dua kondisi pelumasan. Hasil penelitian dapat dinyatakan bahwa kenaikan harga deformasi plastis untuk kondisi dengan pelumas lebih tinggi dari pada kenaikan deformasi plastis untuk kondisi tanpa pelumas.

**Kata kunci:** Deformasi, pelumasan, rasio radius, rolling contact, *running-in*.

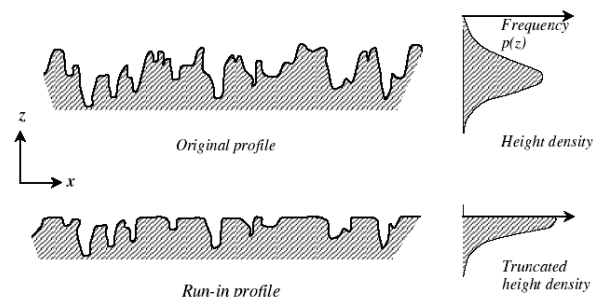
### 1. PENDAHULUAN

*Running-in* adalah suatu cara yang efektif untuk penyesuaian kontak dua komponen dalam situasi fungsional *rolling* dan atau *sliding*. Ada banyak perubahan parameter selama *running-in*, kimiawi atau mekanis. Namun, perubahan geometri-mikro karena keausan atau deformasi plastis dominan (Jamari, 2006).

Dua istilah yang terkait dengan *running-in* adalah pemotongan (*truncation*) asperiti dan pemerasan (*shakedown*) elastis. Dalam pemotongan asperiti, kebanyakan studi telah dilakukan dengan pemodelan statistik pada permukaan komponen. Bentuk perubahan kurva distribusi amplitudo setelah *running-in* ditunjukkan dalam Gambar 1. Orang akan berharap perubahan parameter permukaan seperti kekasaran statistik rata-rata, kekasaran *root-mean-square*, tinggi puncak ke lembah, lereng, dan sebagainya selama *running-in*. Namun, perubahan topografi permukaan sebenarnya tidak hanya distribusi tinggi (satu dimensi) tetapi perubahan dalam tiga dimensi agar sesuai satu sama lain.

Dalam sebagian besar kontak mekanik permukaan, koefisien gesek dan keausan yang menurun karena proses *running-in*. Deformasi plastis menyebabkan peningkatan area kontak dan sebagai hasilnya, penurunan tekanan kontak rata-rata atau daya dukung beban meningkat. Perlu dicatat bahwa jika terjadi deformasi plastis makroskopik, perubahan dari diameter *roller* di

bantalan rol misalnya, akan ada kegagalan fungsi. Tetapi jika terjadi deformasi plastis mikroskopis, yaitu pada tingkat kekasaran, kinerja fungsi dari komponen-komponen mesin akan meningkat.

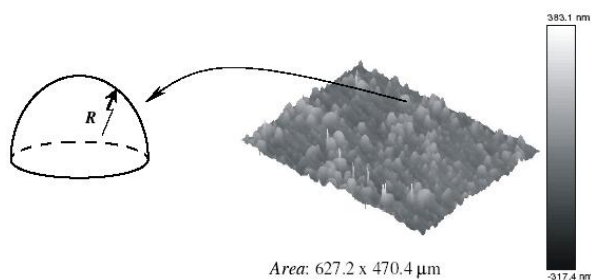


**Gambar 1 Pengaruh *running-in* pada profil permukaan, (Whitehouse, 1994).**

Ketika dua permukaan benda padat saling menekan selalu akan terjadi deformasi kontak, berdasar peninjauan skala yang digunakan, deformasi kontak dapat dikategorikan sebagai *macro contact* atau *micro contact*. Kebanyakan permukaan benda padat adalah tajam pada skala mikro. Titik titik tertinggi (*microprotrusions*), biasa disebut asperiti, ada pada semua permukaan padat, lihat Gambar 2.

Pada permukaan yang tidak dilumasi, ketika permukaan tersebut saling menekan, kontak yang nyata terjadi pada asperiti. Jumlah asperiti pada area kontak semakin banyak seiring meningkatnya beban yang diberikan. Deformasi terjadi pada daerah kontak, dimana tegangan

timbul akibat pembebanan. Tergantung beban yang ditahan oleh asperiti dan sifat mekanik bahan, asperiti akan terdeformasi elastis, elastis-plastis atau plastis (*fully plastic*). Tegangan lokal pada titik kontak jauh lebih tinggi dari pada tegangan nominal. Oleh karena itu deformasi plastis lokal pada umumnya ditemukan pada kontak permukaan yang tajam. Asperiti pada benda padat kadang-kadang dianggap sebagai bentuk bola pada puncaknya dengan ukuran berbeda-beda sedemikian sehingga studi tentang kontak dua permukaan dapat disederhanakan sebagai deretan kontak bola yang terdeformasi pada ujungnya (Jamari, 2006).



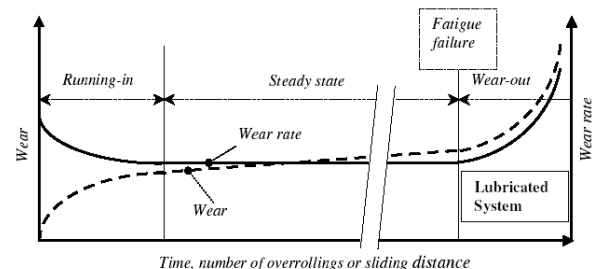
**Gambar 2 Permukaan benda dan asperiti, (Jamari, 2006).**

Sebagai konsekuensi alami suatu interaksi dua permukaan yang saling bergerak relative akan berlangsung gesekan dan keausan antar muka. Gesekan dan keausan bukanlah sifat material, tetapi sifat sistem, tergantung material yang digunakan dan kondisi pengoperasian. Selama interaksi, beban diarahkan, energi mekanik terkonversi, sifat fisika dan kimia material yang saling berinteraksi diubah. Pada dasarnya ilmu tribologi dapat dimengerti melalui pemahaman sifat interaksi dan pemecahan masalah teknologi hubungannya dengan gejala antar permukaan. Kontak *rolling* salah satu solusi yang digunakan untuk mengendalikan gesekan dan keausan kaitannya dengan pembebanan antar permukaan pada dua permukaan yang dipisahkan oleh suatu bentuk *roll*.

Paper ini membahas deformasi plastis pada kontak dua benda kaitannya dengan pengaruh kondisi tanpa pelumasan dan menggunakan pelumas. Masalah ini merupakan dasar pemahaman mengenai *running-in* kaitannya dengan proses *running-in*, yang mana deformasi asperiti adalah salah satu mekanisme dalam proses *running-in*, deformasi asperiti disini ditinjau dari kontak *rolling*. Seperti diketahui prinsip dasar kontak *rolling* adalah kontak statis (*stationary contact*).

## 2. MEKANISME RUNNING-IN

Selama periode *running-in*, puncak-puncak kekasaran hasil akhir proses pemesinan berkurang dengan mekanisme aliran plastis, lembah-lembah terisi dan semua bentuk menjadi saling selaras/sesuai (*matching*), Temperatur lebih tinggi umumnya disebabkan karena laju keausan (*wear rate*) lebih tinggi, tetapi permukaan menjadi lebih halus dan asperiti rata, laju keausan menurun menuju keadaan setimbang (*steady state*). Ada dua mekanisme utama dalam periode *running-in*; deformasi plastis dan pengausan lembut (*mild wear*) (Whitehouse, D. J., 1980). Mekanisme deformasi plastis mirip penghalusan bola (*roller burnishing*), asperiti ditekan kebawah. perubahan topografi permukaan tergantung beban dan arah gerakan. Asperiti-asperiti yang lebih tinggi seolah-olah digosok. Kerugian gesekan umumnya menurun selama periode ini dan celah antar permukaan (*clearance*) bertambah, sehingga menurunkan temperatur permukaan. Laju keausan menurun hingga mencapai laju keausan normal yang stabil (*steady-state*) untuk suatu desain pasangan kontak.



**Gambar 3 Skema representasi dari perilaku keausan sebagai fungsi dari waktu (Jamari, 2006).**

Setelah periode *running-in*, dimana jangka waktu tanpa alternatif tergantung pada sistem tribologi (*tribo-system*), kondisi-kondisi layanan penuh dapat diterapkan tanpa peningkatan laju keausan secara mendadak. Kapasitas kemampuan menahan beban meningkat ke desain operasi. Rezim mantap rendah (*steady low*) laju keausan menjaga untuk umur operasi yang direncanakan. Istilah posisi mantap (*steady state*) didefinisikan sebagai kondisi sistem *tribo (tribo-system)* ditentukan dimana koefisien gesek dinamis rata-rata, laju keausan, dan parameter khusus lain sudah tercapai dan merawat suatu tingkatan yang konstan (Blau, P. J., 1989).

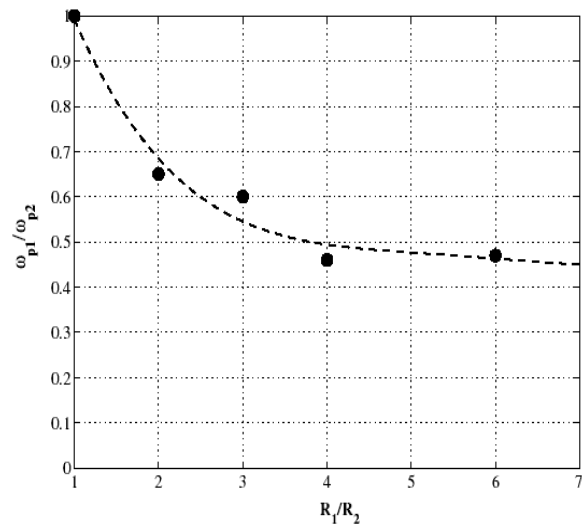
Laju keausan dapat naik sekali lagi ketika waktu operasi menjadi cukup lama untuk proses lelah ke terjadinya dalam lapisan atas permukaan yang terbebani. Suatu kontribusi penting kepada kerugian material/hilangnya material dikendalikan oleh pembebanan berulang dimulai. Partikel dari seperti proses aus lelah (*characteristically*) sangat lebih besar dari pada gabungan *fragment* kecil dengan *adhesive* atau keausan *abrasive* (Williams, J. A., 1994).

**3. KONTAK ROLLING**

Kontak *rolling* dapat ditemukan dalam berbagai aplikasi seperti bantalan rol, roda gigi, ban, serta rel dan roda. Saat beban kontak melebihi batas *shakedown* plastis, siklus berkelanjutan (*continuous cyclic*) deformasi plastis terjadi dekat permukaan kontak. Siklus deformasi mempromosikan perubahan mikro dan menghasilkan kegagalan elemen rol dalam bentuk permulaan retak, pertumbuhan retak, dan fragmentasi. Jelas bahwa deformasi plastis dekat-permukaan berkontribusi pada keausan *sliding* dan permulaan retak kelelahan kontak (Bower, A. F., dan Johnson, K. L., 1991). Pengamatan eksperimental telah menetapkan bahwa kontak *rolling* murni menghasilkan aliran “maju” dan gerakan permukaan progresif meluruh dengan meningkatnya jumlah guliran (*rolling passes*) (Hahn, G. T. dan Huang, Q., 1986).

**4. STUDI PUSTAKA**

Dari hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R., (1992) yang menyatakan bahwa “ketika terjadi kontak asperiti dua benda yang memiliki kekerasan sama, kedalaman deformasi plastis adalah sama untuk masing-masing benda, tidak terikat pada ukuran geometrinya”. Berdasarkan hipotesis ini, Jamari (2006) melakukan eksperimen pada kontak antara dua bola baja keras ( $H = 8,3$  GPa,  $E = 210$  GPa dan  $\nu = 0,3$ ). Sejumlah pasangan kontak dengan rasio radius yang berbeda telah dipilih, dan hasilnya disajikan pada Gambar 4. Jelas, teramati bahkan pada benda yang memiliki kekerasan yang sama, tingkat deformasi plastis benda kontak tidak sama, yang berbeda dengan hipotesis Johnson, K. L. dan Shercliff, H. R.,. Rasio deformasi plastis ( $\omega_{p1}/\omega_{p2}$ ) mengecil dengan kenaikan rasio radius ( $R_1/R_2$ ) benda. Benda dengan radius lebih besar terdeformasi plastis lebih sedikit daripada benda dengan radius lebih kecil.



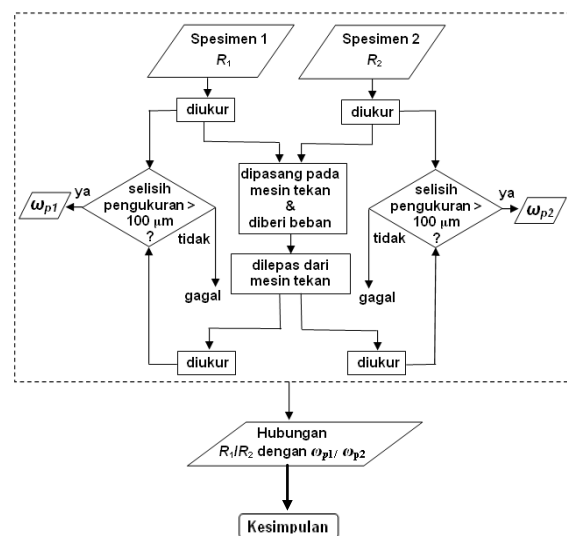
Gambar 4 Rasio Radius Benda Kontak, (Jamari, 2006).

**5. EKSPERIMEN**

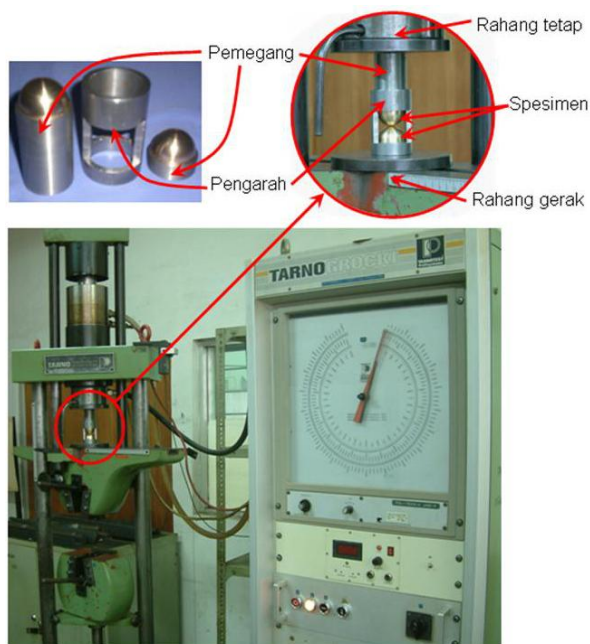
**Prosedur Eksperimen**

Eksperimen dilakukan pada mesin uji tekan, kedua spesimen masing-masing dipasang pada pemegangnya kemudian kedua pemegang beserta spesimennya dipasang pada pengarah dengan posisi saling berhadapan sehingga terjadi kontak di permukaan yang berbentuk setengah bola. Peralatan tersebut diletakkan diantara rahang tetap dengan rahang gerak, sehingga ketika rahang gerak diberi beban maka kedua spesimen akan saling menekan. Beban yang diberikan sebesar 8000 N selama 1 menit.

Garis besar alur eksperimen seperti pada Gambar 5.



Gambar 5 Diagram alir eksperimen



**Gambar 6 Mesin uji tekan.**

**Spesimen**

Bentuk setengah bola dibuat dari bahan *brass* ( $H = 0,31 \text{ GPa}$ ,  $E = 96000 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,3$ ) dengan radius: 17,5; 8,75; 5,84; 4,38; 3,5; 2,92 dan 2,5 mm.



**Gambar 7 Spesimen.**

Spesimen dipasang pada pemegangnya dengan suaian sliding sehingga menjamin keduanya sesumbu, masing-masing pemegang beserta spesimen dimasukkan kedalam pengarah saling berhadapan sehingga kedua spesimen saling kontak seperti Gambar 6, agar kedua spesimen sesumbu maka hubungan pemegang dan pengarah dibuat suaian sliding.

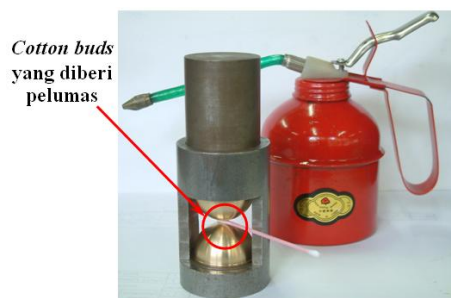
**Detail Eksperimen**

Sebelum melakukan eksperimen semua spesimen dibersihkan menggunakan alkohol, kemudian dikeringkan di udara bebas. Spesimen diukur arah axial menggunakan mikrometer, agar titik pengukuran tepat pada sumbu spesimen maka digunakan alat bantu penepat titik sumbu (*center locator*) seperti pada Gambar 8.



**Gambar 8 Mikrometer dan center locator.**

Eksperimen dilakukan dengan cara menekan spesimen pada mesin uji tekan. Pada eksperimen ini menggunakan 7 macam perbandingan pasangan, mulai dari pasangan spesimen yang memiliki perbandingan radius 1:1; 2:1; 3:1; 4:1; 5:1; 6:1; dan 7:1, agar hasil eksperimen akurat tiap perbandingan pasangan dibuat 3 pasang spesimen. Eksperimen dilakukan menggunakan dua kondisi kontak, yakni kondisi kering (tanpa pelumas) dan kondisi dilumasi. Untuk melakukan eksperimen kondisi kering sebelum spesimen dipasang pada pengarah dibersihkan menggunakan alkohol terlebih dahulu, dikeringkan di udara bebas dan diukur arah axial seperti Gambar 8, kemudian baru dipasang pada pengarah selanjutnya dipasang pada mesin uji tekan untuk dilakukan pengujian. Sedangkan untuk kondisi dilumasi langkahnya sama seperti di atas tetapi setelah spesimen dipasang pada pengarah diberi pelumas seperti Gambar 9.



**Gambar 9 Pemberian pelumas pada spesimen.**

Pembebanan tiap pasang spesimen dilakukan dengan menahan beban sebesar 8000 N selama 1 menit, kemudian beban diiadakan. Setelah spesimen dilepas dari pemegangnya kemudian diukur lagi arah axial seperti Gambar 8, selisih panjang spesimen sebelum dengan

setelah diuji merupakan besarnya deformasi yang terjadi pada masing masing spesimen.

**6. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil pengukuran spesimen sebelum dan setelah diuji dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

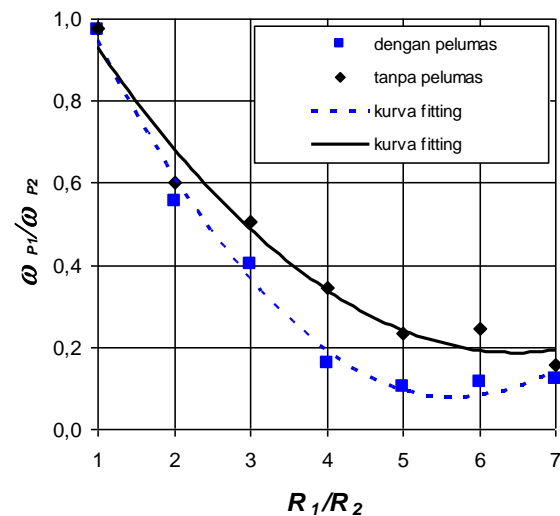
**Tabel 1 Deformasi spesimen dengan pelumas.**

| $R_1/R_2$ | No  | $L_{R10}$ | $L_{R1d}$ | $\omega_{P1}$ | Mean $\omega_{P1}$ | No | $L_{R20}$ | $L_{R2d}$ | $\omega_{P2}$ | Mean $\omega_{P2}$ | $\omega_{P1}/\omega_{P2}$ | $\omega_{P1} + \omega_{P2}$ |
|-----------|-----|-----------|-----------|---------------|--------------------|----|-----------|-----------|---------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1         | 1.1 | 20,578    | 20,455    | 0,123         | 0,121              | 1  | 20,545    | 20,422    | 0,123         | 0,124              | 0,973                     | 0,246                       |
|           | 1.2 | 20,556    | 20,438    | 0,118         |                    | 2  | 20,491    | 20,366    | 0,125         |                    |                           | 0,243                       |
|           | 1.3 | 20,475    | 20,354    | 0,121         |                    | 3  | 20,486    | 20,362    | 0,124         |                    |                           | 0,245                       |
| 2         | 2.1 | 20,659    | 20,562    | 0,097         | 0,098              | 1  | 11,634    | 11,456    | 0,178         | 0,176              | 0,556                     | 0,275                       |
|           | 2.2 | 20,588    | 20,490    | 0,096         |                    | 2  | 11,670    | 11,495    | 0,175         |                    |                           | 0,275                       |
|           | 2.3 | 20,467    | 20,368    | 0,099         |                    | 3  | 11,664    | 11,488    | 0,176         |                    |                           | 0,275                       |
| 3         | 3.1 | 20,519    | 20,398    | 0,121         | 0,125              | 1  | 8,971     | 8,653     | 0,318         | 0,310              | 0,404                     | 0,439                       |
|           | 3.2 | 20,618    | 20,490    | 0,128         |                    | 2  | 8,995     | 8,690     | 0,305         |                    |                           | 0,433                       |
|           | 3.3 | 20,523    | 20,397    | 0,126         |                    | 3  | 8,958     | 8,652     | 0,306         |                    |                           | 0,432                       |
| 4         | 4.1 | 20,293    | 20,208    | 0,085         | 0,085              | 1  | 7,278     | 6,750     | 0,528         | 0,529              | 0,161                     | 0,613                       |
|           | 4.2 | 20,355    | 20,268    | 0,087         |                    | 2  | 7,326     | 6,795     | 0,531         |                    |                           | 0,618                       |
|           | 4.3 | 20,285    | 20,201    | 0,084         |                    | 3  | 7,393     | 6,866     | 0,527         |                    |                           | 0,611                       |
| 5         | 5.1 | 20,305    | 20,238    | 0,067         | 0,069              | 1  | 6,398     | 5,735     | 0,663         | 0,666              | 0,103                     | 0,730                       |
|           | 5.2 | 20,304    | 20,234    | 0,070         |                    | 2  | 6,490     | 5,821     | 0,669         |                    |                           | 0,739                       |
|           | 5.3 | 20,348    | 20,273    | 0,069         |                    | 3  | 6,461     | 5,794     | 0,667         |                    |                           | 0,736                       |
| 6         | 6.1 | 20,201    | 20,110    | 0,091         | 0,085              | 1  | 5,715     | 4,980     | 0,735         | 0,734              | 0,116                     | 0,826                       |
|           | 6.2 | 20,262    | 20,179    | 0,083         |                    | 2  | 5,778     | 5,044     | 0,734         |                    |                           | 0,817                       |
|           | 6.3 | 20,510    | 20,429    | 0,081         |                    | 3  | 5,750     | 5,018     | 0,732         |                    |                           | 0,813                       |
| 7         | 7.1 | 20,381    | 20,289    | 0,092         | 0,103              | 1  | 5,171     | 4,307     | 0,864         | 0,854              | 0,121                     | 0,956                       |
|           | 7.2 | 20,369    | 20,260    | 0,109         |                    | 2  | 5,229     | 4,380     | 0,849         |                    |                           | 0,958                       |
|           | 7.3 | 20,350    | 20,241    | 0,109         |                    | 3  | 5,188     | 4,338     | 0,850         |                    |                           | 0,959                       |

**Tabel 2 Deformasi spesimen tanpa pelumas.**

| $R_1/R_2$ | No  | $L_{R10}$ | $L_{R1d}$ | $\omega_{P1}$ | Mean $\omega_{P1}$ | No | $L_{R20}$ | $L_{R2d}$ | $\omega_{P2}$ | Mean $\omega_{P2}$ | $\omega_{P1}/\omega_{P2}$ | $\omega_{P1} + \omega_{P2}$ |
|-----------|-----|-----------|-----------|---------------|--------------------|----|-----------|-----------|---------------|--------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1         | 1.1 | 20,397    | 20,290    | 0,107         | 0,110              | 1  | 20,176    | 20,065    | 0,111         | 0,112              | 0,976                     | 0,218                       |
|           | 1.2 | 20,475    | 20,366    | 0,109         |                    | 2  | 20,232    | 20,120    | 0,112         |                    |                           | 0,221                       |
|           | 1.3 | 20,421    | 20,308    | 0,113         |                    | 3  | 20,408    | 20,294    | 0,114         |                    |                           | 0,227                       |
| 2         | 2.1 | 20,329    | 20,238    | 0,091         | 0,094              | 1  | 11,559    | 11,402    | 0,157         | 0,157              | 0,601                     | 0,248                       |
|           | 2.2 | 20,128    | 20,033    | 0,095         |                    | 2  | 11,548    | 11,392    | 0,156         |                    |                           | 0,251                       |
|           | 2.3 | 20,418    | 20,322    | 0,097         |                    | 3  | 11,521    | 11,363    | 0,158         |                    |                           | 0,255                       |
| 3         | 3.1 | 20,439    | 20,329    | 0,110         | 0,109              | 1  | 8,425     | 8,208     | 0,217         | 0,215              | 0,507                     | 0,327                       |
|           | 3.2 | 20,352    | 20,244    | 0,108         |                    | 2  | 8,512     | 8,296     | 0,216         |                    |                           | 0,324                       |
|           | 3.3 | 20,371    | 20,262    | 0,109         |                    | 3  | 8,527     | 8,315     | 0,212         |                    |                           | 0,321                       |
| 4         | 4.1 | 20,464    | 20,357    | 0,107         | 0,107              | 1  | 6,998     | 6,684     | 0,314         | 0,313              | 0,343                     | 0,421                       |
|           | 4.2 | 20,381    | 20,273    | 0,108         |                    | 2  | 6,986     | 6,674     | 0,312         |                    |                           | 0,420                       |
|           | 4.3 | 20,450    | 20,343    | 0,107         |                    | 3  | 6,925     | 6,612     | 0,313         |                    |                           | 0,420                       |
| 5         | 5.1 | 20,128    | 20,017    | 0,111         | 0,114              | 1  | 6,231     | 5,748     | 0,483         | 0,485              | 0,235                     | 0,594                       |
|           | 5.2 | 20,419    | 20,306    | 0,113         |                    | 2  | 6,022     | 5,538     | 0,484         |                    |                           | 0,597                       |
|           | 5.3 | 20,149    | 20,031    | 0,118         |                    | 3  | 6,118     | 5,629     | 0,489         |                    |                           | 0,607                       |
| 6         | 6.1 | 20,162    | 20,041    | 0,121         | 0,121              | 1  | 5,890     | 5,333     | 0,557         | 0,497              | 0,244                     | 0,678                       |
|           | 6.2 | 20,368    | 20,248    | 0,120         |                    | 2  | 5,998     | 5,569     | 0,429         |                    |                           | 0,549                       |
|           | 6.3 | 20,352    | 20,229    | 0,123         |                    | 3  | 5,989     | 5,485     | 0,504         |                    |                           | 0,627                       |
| 7         | 7.1 | 20,329    | 20,266    | 0,063         | 0,081              | 1  | 5,766     | 5,309     | 0,457         | 0,515              | 0,157                     | 0,520                       |
|           | 7.2 | 20,117    | 20,033    | 0,084         |                    | 2  | 5,545     | 5,021     | 0,524         |                    |                           | 0,608                       |
|           | 7.3 | 20,319    | 20,224    | 0,095         |                    | 3  | 5,542     | 4,978     | 0,564         |                    |                           | 0,659                       |

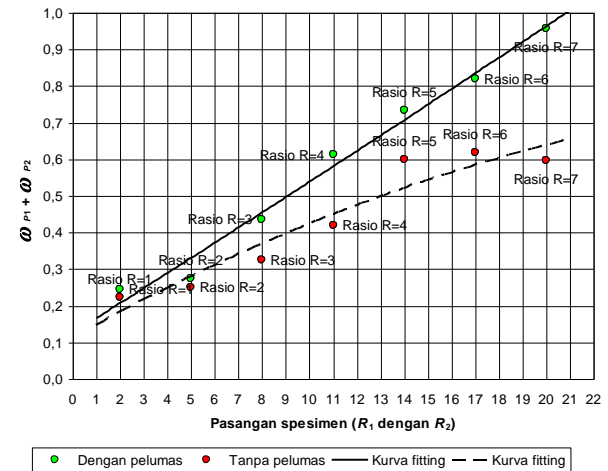
Dari Tabel 1 dan Tabel 2 jika dibuat grafik  $\omega_{P1}/\omega_{P2}$  vs  $R_1/R_2$  dapat dilihat pada Gambar 10.



**Gambar 10 Grafik  $\omega_{P1}/\omega_{P2}$  vs  $R_1/R_2$  dengan dan tanpa pelumas.**

Dari Gambar 10 terlihat rasio deformasi menurun ketika rasio radius meningkat.

Dari Tabel 1 dan Tabel 2 jika dibuat grafik  $\omega_{P1} + \omega_{P2}$  vs pasangan  $R_1$  dan  $R_2$  dapat dilihat pada Gambar 11.



**Gambar 11 Grafik  $\omega_{P1} + \omega_{P2}$  vs pasangan  $R_1$  dan  $R_2$  dengan dan tanpa pelumas.**

Dari Gambar 11 terlihat deformasi kedua spesimen meningkat ketika rasio radius spesimen meningkat.

**7. KESIMPULAN**

Dari Gambar 10 terlihat kedua kurva fitting sesuai dengan peneliti sebelumnya yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Dari Gambar 11 dapat disimpulkan bahwa kenaikan harga deformasi plastis untuk kondisi dengan pelumas lebih tinggi dari pada kenaikan deformasi plastis untuk kondisi tanpa pelumas.

**8. DAFTAR PUSTAKA**

Jamari, (2006), *Running-in of rolling contacts*, Disertasi Program Doktor, University of Twente, The Netherlands.

Blau, P. J., (1989), *Friction and Wear Transitions of Materials*, Noyes, Park Ridge, NJ.

Bower, A. F. and Johnson, K. L., (1991), "Plastic Flow and Shakedown of the Rail

Surface in Repeated Wheel-Rail Contact,” *Wear*, **114**, pp. 1–18.

Hahn, G. T., and Huang, Q., (1986), “Rolling Contact Deformation of 1100 Aluminum Disks,” *Metall. Trans. A*, **17A**, pp. 1561–1572.

Johnson, K.L. and Shercliff, H. R., (1992), “Shakedown of 2-dimensional asperities in sliding contact,” *Int. Journal of Mech. Sciences* **34**, pp. 375 – 394.

Whitehouse, D. J., (1980), *The effect of surface topography on wear, Fundamentals of Tribology*, edited by Suh and Saka, MIT, pp. 17 – 52.

Whitehouse, D. J., (1994), *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing.

Williams, J. A., (1994), *Engineering Tribology*, Oxford University Press.