

BAB III

PEMODELAN DAN PERHITUNGAN KEAUSAN PADA KONTAK BERPELUMAS

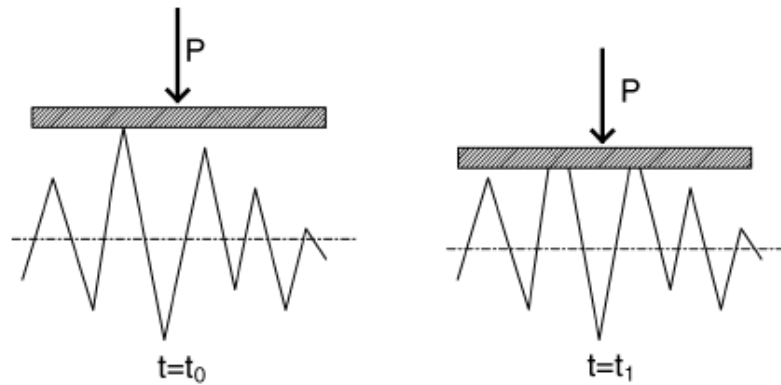
3.1 Pemodelan keausan

Banyak faktor yang menyebabkan keausan pada suatu permukaan, salah satunya adalah keausan yang diakibatkan oleh permukaan yang saling bergesekan satu sama lain. Pada gerak *rolling*, keausan yang terjadi akan menimbulkan perubahan kekasaran permukaan. Dalam hal ini lebih dominan disebabkan karena deformasi plastis yang terjadi pada tingkat *asperity*. Keausan karena *sliding* yang terjadi adalah *abrasive wear* yang banyak dijumpai pada beberapa komponen dalam suatu mesin. Prediksi keausan ini yang terpenting adalah seberapa besar material yang akan hilang selama operasi waktu yang diberi. Jika diketahui semua mekanisme-mekanisme tersebut dan dimodelkan dengan matematika akan dapat diketahui keausan yang terjadi pada suatu benda dan bahkan dapat diperkirakan atau diprediksi keausan yang terjadi.

Dari hal ini, prediksi yang paling diterima oleh semua kalangan mengenai gesekan dengan perilaku keausan adalah dengan membuat sebuah percobaan pengausan (*wear experiment*). Untuk saat ini keausan hanya dapat diketahui dengan suatu metode pendekatan. Oleh karena itu pada bab ini, akan mengulas beberapa metode yang telah dilakukan oleh para peneliti keausan.

3.1.1 Model PEHL Wang [20]

Pada model kontak *running-in* dibawah kondisi *partial elastohydrodynamic lubrication* (PEHL), *asperity* yang berkontak langsung dan keausan tidak dapat dipisahkan karena tebal lapisan pelumas hampir sama dengan kekasaran permukaan. Oleh karena itu, kedua permukaan yang berkontak tidak dapat dipisahkan secara sempurna. Dalam kondisi tersebut, terdapat kontak antar *asperity* dan lapisan pelumas yang selanjutnya akan menahan beban yang diberikan pada kondisi operasional.



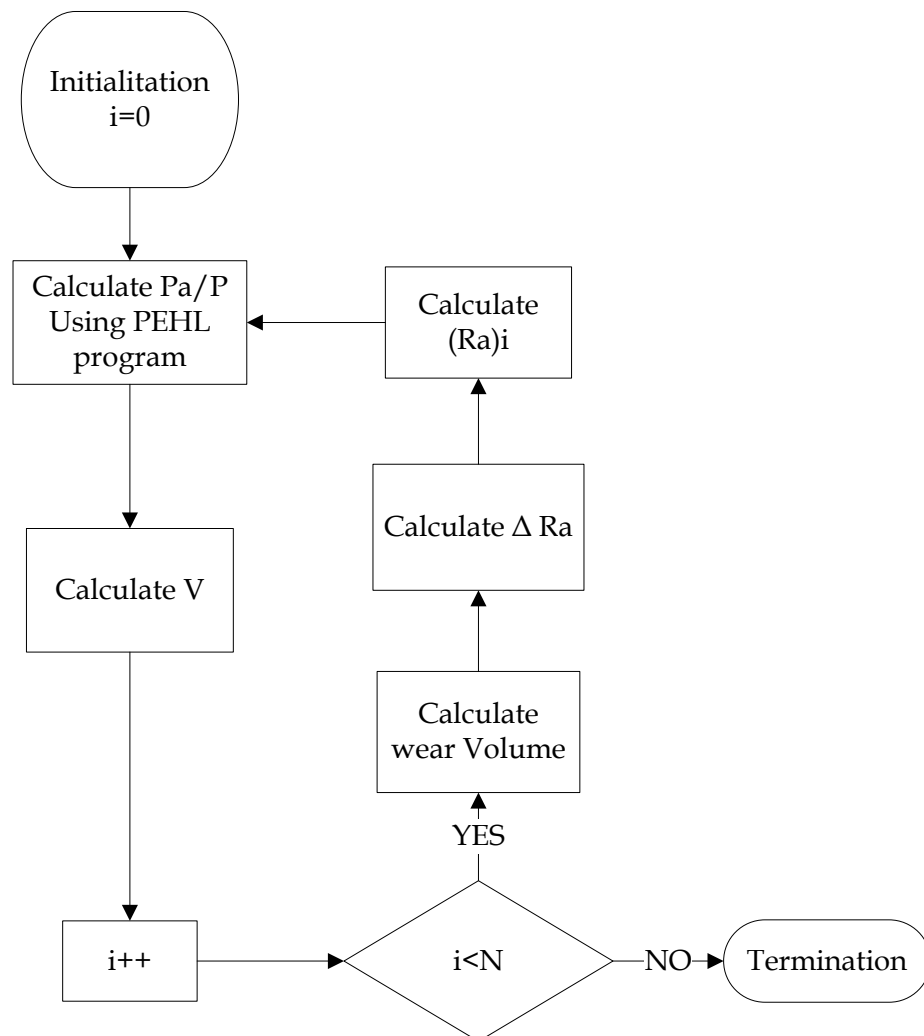
Gambar 3.1. Skema model keausan PEHL [20].

Model PEHL yang dikembangkan oleh Wang diilustrasikan dengan model kontak antara permukaan yang datar (*flat*) dan keras dengan permukaan lain yang kasar dan lunak. Skema kontak tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.1. Gambar tersebut menunjukkan pada saat $t = t_0$ tekanan kontak *asperity* besar karena luas kontak yang terjadi kecil. Tekanan kontak *asperity* yang besar menimbulkan deformasi plastis yang besar pada *asperity* sehingga keausan terjadi dan laju keausannya besar. Pada $t = t_1$, luas kontak meningkat karena keausan sehingga tekanan kontak *asperity* mengalami penurunan. Laju keausan pada $t = t_1$ lebih kecil dibandingkan dengan $t = t_0$. Selama *running-in*, luas kontak meningkat dan tekanan kontak *asperity* turun sehingga laju keausan mengalami penurunan.

Pada kondisi PEHL, beban total diterima oleh pelumas dan *asperity*. Ketika terjadi kontak akan ada parameter luas kontak yang dinotasikan dengan A_r dan beban yang diterima oleh *asperity* yang dinotasikan dengan P_a . Selanjutnya dapat diperoleh tekanan kontak *asperity* rata-rata dari kedua parameter tersebut. Keausan pada fase *running-in* dapat dideskripsikan sebagai proses berkurangnya tekanan kontak *asperity* rata-rata sama seperti laju keausan. Dengan adanya perubahan tekanan ini, dicari keausan yang terjadi dengan persamaan keausan Archard.

$$\dot{V} = k \frac{P}{H} \quad (3.1)$$

Untuk memperoleh perubahan volume keausan pada kondisi tertentu perlu diketahui nilai rasio beban kontak *asperity* P_a/P dan kekasaran permukaan R_a . P_a dapat diperoleh dari perhitungan PEHL. R_a dan volume keausan untuk kasus PEHL sangat bergantung pada bentuk geometri *asperity*. Perhitungan volume keausan dapat dimulai dengan data kekasaran awal. Kekasaran karena material yang hilang dapat diprediksi dengan volume keausan. Selanjutnya P_a dapat diperbarui dengan nilai R_a yang baru. Proses perhitungan dapat dilakukan secara berulang sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 3.2.

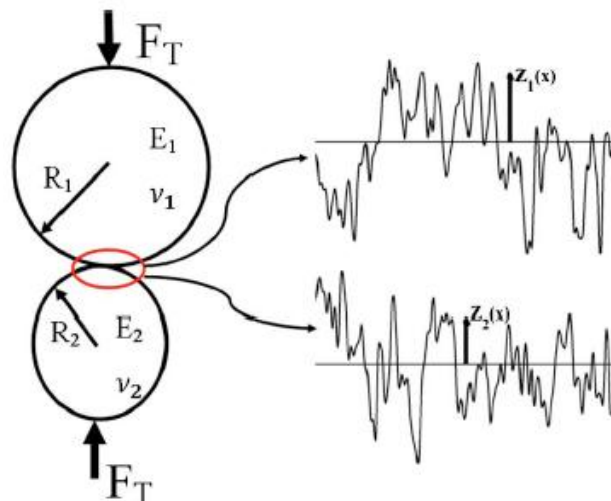


Gambar 3.2. Alur perhitungan perubahan *surface roughness* pada model PEHL [20].

3.1.2 Model *load sharing concept* Akbarzadeh [3]

Model yang dikembangkan oleh akbarzadeh adalah model kontak berpelumas yang disebut *mixed lubrication* dimana pelumas tidak memisahkan kedua permukaan secara sempurna sehingga masih ada sebagian *asperity* yang berkontak,. Beban yang diterima selama kontak ditahan oleh pelumas (*fluid film*) dan *asperity*. Untuk menghitung distribusi beban yang diterima *asperity* dan pelumas, digunakan suatu metode yaitu *load sharing concept* yang dikembangkan dari persamaan Moes [21].

Model Akbarzadeh menggunakan kontak berpelumas antara dua roller dengan *radius*, modulus elastisitas dan *Poisson's ratio* tertentu. Kedua roller juga mempunyai profil kekasaran permukaan awal dan dikenai beban tertentu. Skema kontak tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.3.



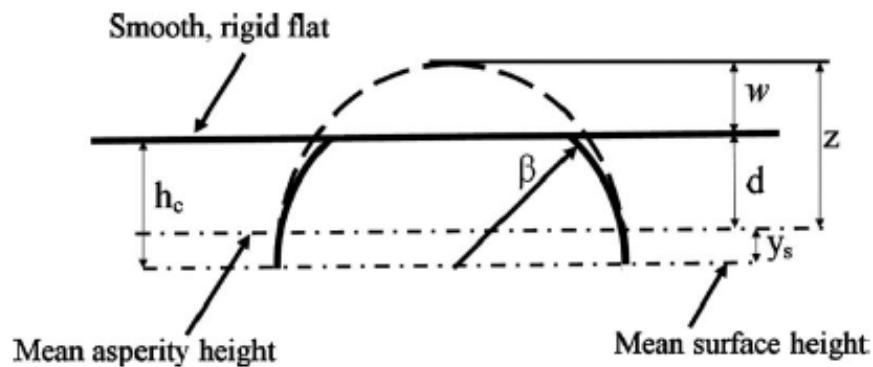
Gambar 3.3: Skema kontak antara dua roller [3].

Pendekatan untuk mempelajari perilaku *running-in* didasarkan pada kerusakan plastis *asperity*. Karena permukaan kedua roller saling mengalami *sliding*, *asperity* mengalami deformasi elastis dan plastis. Tinggi *asperity*, presentase beban yang diterima *asperity* dan pelumas, dan koefisien gesek berubah terhadap waktu karena permukaan cenderung berubah secara berangsur-angsur sampai pada kondisi *steady*. Pada kondisi ini koefisien gesek dan laju keausan mengalami kestabilan.

Kontak yang terjadi pada *asperity* dimodelkan dengan kontak antara *hemispherical* dengan *rigid flat surface*, dapat dilihat skemanya pada Gambar 3.4. Dalam hal

ini *hemi-spherical* mewakili puncak dari *asperity* yang memiliki radius β dan ketinggian z . Tebal lapisan pelumas dinotasikan dengan h_c , sedangkan y_s adalah selisih ketinggian permukaan rata-rata dengan ketinggian *asperity* rata-rata. Perubahan tinggi *asperity* setelah kontak atau disebut *interference* (w) dirumuskan dengan,

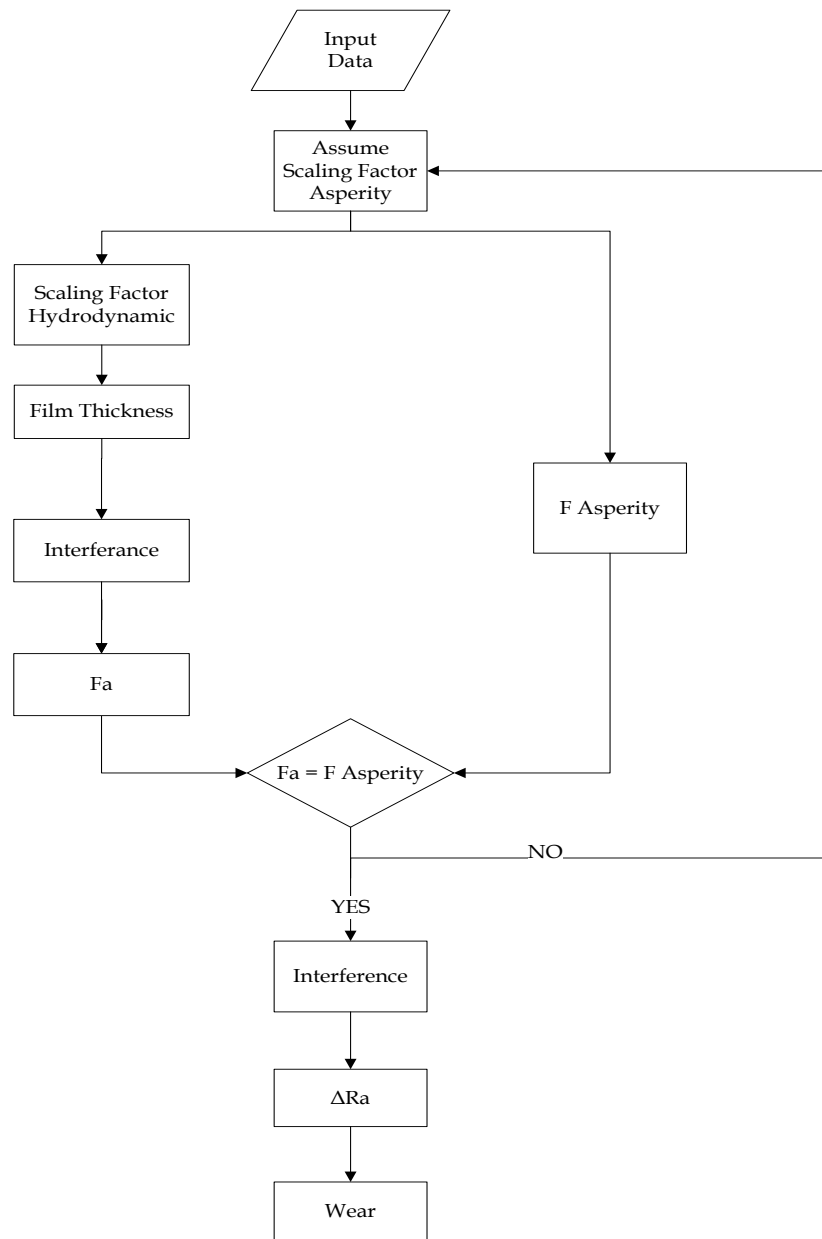
$$w = z - h_c + y_s \quad (3.2)$$



Gambar 3.4. Skema kontak pada *asperity* [3].

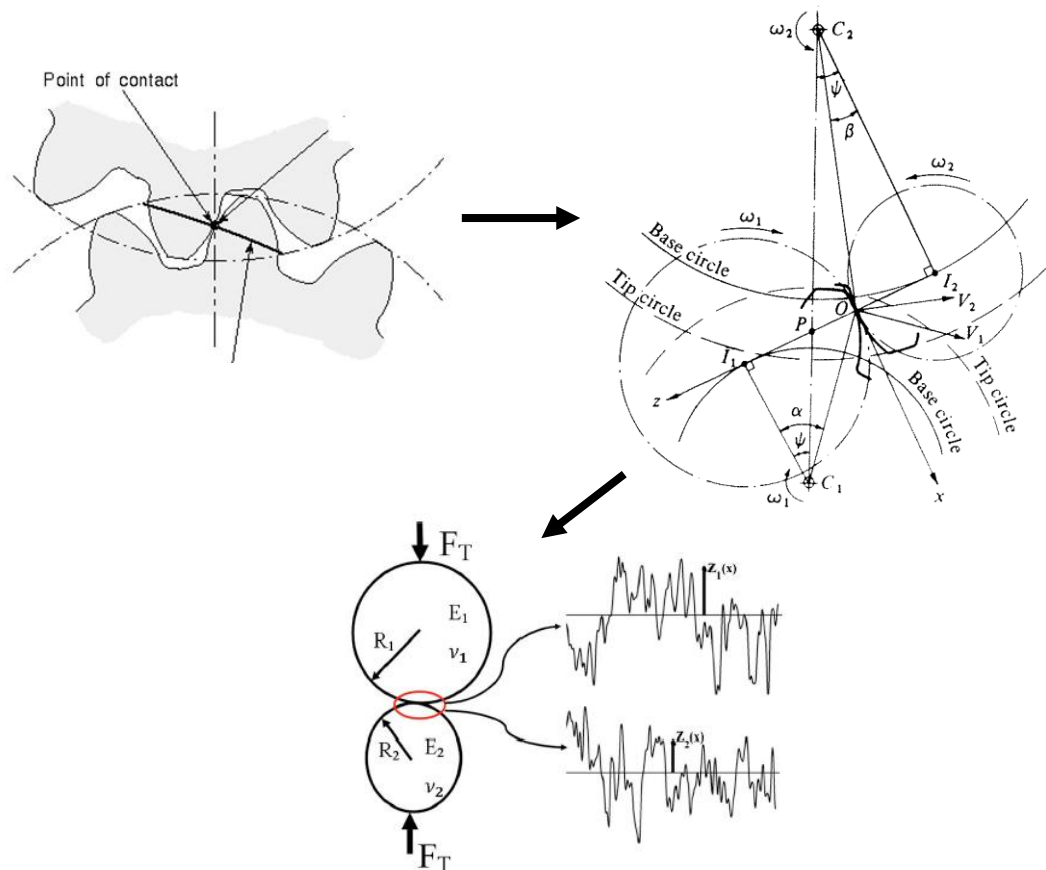
Dengan adanya perubahan nilai *interference* yang terjadi pada *asperity*, ada 3 jenis defofmasi yang mungkin dialami oleh suatu *asperity*, yaitu deformasi elastis, deformasi elastoplastis dan deformasi plastis. Deformasi plastis yang terjadi pada *asperity* menghasilkan perubahan permanen pada profil kekasaran dari permukaan yang berkontak sehingga mempengaruhi koefisien gesek, *load sharing scaling factor*, dan laju keausan.

Parameter input yang digunakan dalam memprediksi keausan adalah profil kekasaran permukaan, geometri dari roller, sifat bahan, kecepatan, beban, dan sifat pelumas dan parameter prediksi adalah faktor skala γ_1 dan γ_2 . Fase *steady-state* dimulai ketika *running-in* selesai. Pada fase *steady-state*, koefisien gesekan dan laju keausan tetap konstan. Alur perhitungan perubahan *surface roughness* pada model keausan dengan *load sharing concept* ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Alur perhitungan perubahan *surface roughness* pada model keausan dengan *load sharing concept*.

3.1.3 Present model

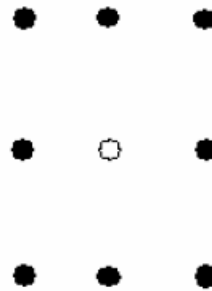


Gambar 3.6. Kontak antara dua roda gigi dimodelkan sebagai kontak antara dua silinder.

Dua buah roda gigi saling kontak dapat dimodelkan dengan kontak antara dua buah silinder seperti pada Gambar 3.6 sehingga geometri kontak yang terbentuk adalah *line contact*. Seperti dalam bahasan sebelumnya dalam bab 2, pada kasus *line contact* akan ada panjang kontak yang dinotasikan dengan B dan lebar kontak yang dinotasikan dengan b . Dari dua variabel tersebut dapat diperoleh luas area kontak. Ilustrasi *line contact* dapat dilihat pada Gambar 2.14 (a).

Jika dilihat dengan skala mikro, dalam area kontak tersebut terdapat banyak *asperity* yang saling kontak tetapi tidak semua *asperity* yang ada mengalami kontak. Hanya *asperity* yang memiliki ketinggian lebih dari tinggi pelumas yang saling kontak. Dalam hal ini, ada suatu pendekatan yang disebut dengan *summit*. *Summit* merupakan

titik tertinggi diantara delapan titik didekatnya. Ilustrasi *summit* dapat dilihat pada Gambar 3.7. Dengan pendekatan ini maka tidak semua *asperity* yang ada mengalami kontak.



Gambar 3.7. Definisi *summit* [19].

3.2 Perhitungan keausan dengan *load sharing concept*

Metode *load sharing concept* yang dikembangkan dari persamaan Moes banyak digunakan dalam perhitungan untuk menghitung distribusi beban yang diterima *asperity* dan pelumas. Hasil perhitungan ini selanjutnya digunakan untuk memprediksi keausan pada kontak dua permukaan, dengan nilai kekasaran tertentu yang disertai dengan pelumasan. Dalam kasus ini, dipelajari fenomena *mixed lubrication*, dimana beban yang terjadi saat kontak dan gerak relatif ditumpu oleh *fluid film* dan *asperity*.

Moes mengembangkan persamaan untuk menghitung ketebalan *fluid film* dalam kasus *elastohydrodynamic lubrication* (EHL) dengan asumsi permukaan yang berkontak halus (*smooth surface*) [21]. Awalnya Moes mengembangkan persamaan untuk memprediksi ketebalan pusat *fluid film* untuk EHL pada kasus *smooth surfaces*. *Non-dimensional film thickness, Hc*, adalah:

$$\left[H_{RI}^{7/3} + H_{EI}^{7/3} \cdot 3^{s/7} + H_{RP}^{-7/2} + H_{EP}^{-7/2} \cdot 2^{-s/7} \right]^{1/s} \quad (3.3)$$

dimana

$$s = \frac{1}{5} \left(7 + 8e^{\left(\frac{2H_{EI}}{H_{RI}} \right)} \right) \quad (3.4)$$

Dengan parameter yang digunakan sebagai berikut :

$$H_{RI} = 3 W U_{\Sigma}^{-0.5} \quad (3.5)$$

$$H_{EI} = 2.621 W U_{\Sigma}^{-0.5} \quad (3.6)$$

$$H_{RP} = 1.287 G U_{\Sigma}^{-0.25} \quad (3.7)$$

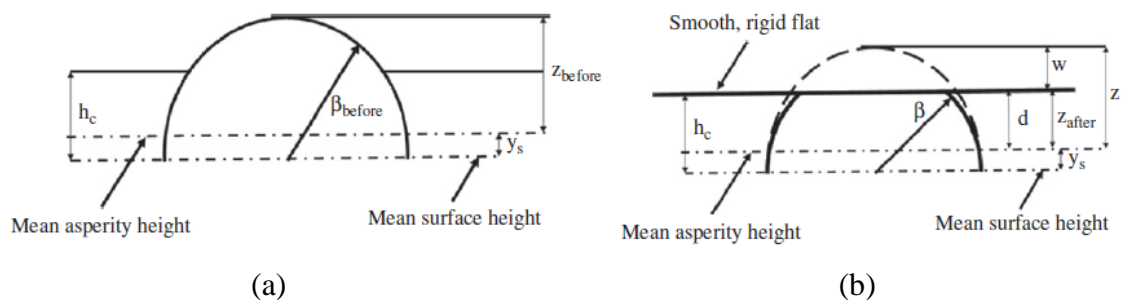
$$H_{EP} = 1.311 W U_{\Sigma}^{-0.5} \quad (3.8)$$

$$W = \frac{F_T}{E_p R' B} \quad (3.9)$$

$$G = \alpha E_p \quad (3.10)$$

$$U_{\Sigma} = \frac{\mu_0 u}{E_p R'} \quad (3.11)$$

$$H_C = \frac{h}{R'} U_{\Sigma}^{-0.5} \quad (3.12)$$



Gambar 3.8. Skema kontak *asperity* (a) sebelum kontak (b) setelah deformasi plastis [12].

Gambar 3.8 menunjukkan skema kontak *asperity* (a) sebelum kontak (b) setelah deformasi plastis. Dari gambar tersebut dapat dilihat ketika dua permukaan berpelumas berkontak, beban diterima *asperity* dan pelumas. Beban yang diterima *asperity* menyebabkan terjadinya deformasi sejauh *interference* (w). Ketinggian *fluid film* dapat

dilihat dinotasikan dengan h_c yang ikut menerima tekanan kontak. Ketebalan *fluid film* memiliki efek signifikan pada *interference* yang dialami *asperity*.

$$w = z - h_c + y_s \quad (3.2)$$

Dengan adanya perubahan nilai *interference* yang terjadi pada *asperity*, ada 3 jenis defofmasi yang mungkin dialami oleh suatu *asperity*, yaitu deformasi elastic, deformasi elastoplastis dan deformasi plastis. Untuk tiap tipe deformasi, memiliki persamaan gaya yang berbeda-beda, yaitu:

a. Deformasi elastic.

Pada deformasi ini, setelah pembebanan tidak dilakukan, *asperity* yang mengalami deformasi akan kembali ke bentuk geometri awal. Persamaan luas kontak dan gaya kontakannya adalah:

$$A_{ie} = \pi\beta_i w_i \quad (3.13)$$

$$F_{ie} = \frac{4}{3} E_p \beta_i^{0.5} w_i^{0.5} \quad (3.14)$$

b. Deformasi elastoplastis

Deformasi ini merupakan peralihan dari deformasi elastic menuju deformasi plastis, untuk persamaan luas kontak dan gaya kontakannya, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$A_{iep} = \pi\beta_i w_i \left(1 - 2 \left(\frac{w_i - w_e}{w_p - w_e} \right)^3 + 3 \left(\frac{w_i - w_e}{w_p - w_e} \right)^2 \right) \quad (3.15)$$

$$F_{iep} = \left(H - 0.6H \frac{\ln w_p - \ln w_i}{\ln w_p - \ln w_e} \right) A_{iep} \quad (3.16)$$

c. Deformasi plastis

Pada deformasi ini, setelah pembebanan tidak dilakukan, asperity yang mengalami deformasi akan tetap pada bentuk geometri setelah pembebanan. Persamaan luas kontak dan gaya nya adalah:

$$A_{ip} = 2\pi\beta_i w_i \quad (3.17)$$

$$F_{ip} = HA_{ip} \quad (3.18)$$

Kontak area total dan gaya kontak total yang terjadi merupakan penjumlahan dari ketiga jenis deformasi diatas, sehingga persamaan luas area kontak total dan gaya kontak totalnya menjadi:

$$F_c = \sum_{i=1}^n F_{ei} + F_{epi} + F_{pi} \quad (3.19)$$

$$A_c = \sum_{i=1}^n A_{ei} + A_{epi} + A_{pi} \quad (3.20)$$

Karena terjadi kontak dalam kondisi *mixed lubricated*, maka beban total yang diterima oleh asperity dan fluid film. Berdasarkan *load sharing concept, hydrodynamics film* dan *asperity* berkontribusi dalam membagi beban total yang diterima adalah:

$$F_T = F_H + F_C \quad (3.21)$$

Pembagian beban yang diterima *asperity* dan pelumas diwakili dengan

$$\frac{F_T}{\gamma_1} = \text{beban yang diterima } \textit{fluid film}$$

$$\frac{F_T}{\gamma_2} = \text{beban yang diterima } \textit{asperity}$$

fluid film dan *asperity* menerima beban sebesar:

$$F_T = \frac{F_T}{\gamma_1} + \frac{F_T}{\gamma_2} \quad (3.22)$$

parameter γ_1 dan γ_2 memiliki hubungan:

$$1 = \frac{1}{\gamma_1} + \frac{1}{\gamma_2} \quad (3.23)$$

Dengan adanya “*load sharing concept*”, masalah dibagi menjadi dua bagian. Bagian yang pertama adalah kontak antara dua roller dengan modulus elastisitas yang equivalent (E_P/γ_1) dengan gaya yang bekerja sebesar (F_T/γ_1) diselesaikan untuk mendapatkan nilai *film thickness* (h_c). Bagian yang kedua adalah kontak dua permukaan dengan modulus elastisitas (E_P/γ_2) dimana gaya yang bekerja equivalent dengan (F_T/γ_2). Dengan substitusi gaya yang bekerja sebesar (F_T/γ_1) dan modulus elastisitas (E_P/γ_1) didapat persamaan untuk mencari *film thickness* H_C , yaitu:

$$H_C = \left[\gamma_1^{s/2} H_{RI}^{7/3} + \gamma_1^{14/15} H_{EI}^{7/3} \gamma_1^{3s/7} + \gamma_1^{-s/2} H_{RP}^{-7/2} + H_{EP}^{-7/2} \gamma_1^{-2s/7} \right]^{1/s} \gamma_1^{1/2} \quad (3.24)$$

$$s = \frac{1}{5} \left(7 + 8e^{\left(\frac{2 \gamma_1^{-7/5} H_{EI}}{H_{RI}} \right)} \right) \quad (3.25)$$

Setelah H_C (*non-dimensional film thickness*) diketahui, selanjutnya dapat dicari h_c (*dimensional film thickness*) yang dihitung dari persamaan:

$$H_C = \frac{h}{R'} U_\Sigma^{-0.5} \quad (3.12)$$

Perhitungan di atas dengan asumsi temperatur pelumas saat perhitungan sama dengan temperatur pelumas pada bagian inlet. Ketika efek temperatur juga diperhatikan, maka digunakan persamaan:

$$C_t = \frac{h_{thermal}}{h_{isothermal}} = \frac{1}{1 + 0.00766G^{0.687}W^{0.447}TL^{0.527}e^{0.75sr}} \quad (3.26)$$

Selama fase *running-in*, tinggi *asperity* yang mengalami deformasi plastis dan elastoplastis akan mengalami perubahan. Karena perubahan tinggi *asperity*, *nondimensional wear volume* dihitung dengan persamaan:

$$\bar{V} = \frac{1}{LRa1} \int_0^L |z_b(x) - z_a(x)| dx \quad (3.27)$$

selanjutnya *wear volume* dihitung dengan persamaan:

$$V = 2\pi R' BRa1\bar{V} \quad (3.28)$$

wear coefficient dihitung dengan persamaan:

$$k(t) = \frac{VH}{F_T U_{dif} t} \quad (3.29)$$