

### BAB III

#### MODEL - MODEL KEAUSAN

##### 3.1 Model keausan Archard [15]

Archard 1953 mengusulkan suatu model pendekatan untuk mendeskripsikan keausan *sliding*. Dia berasumsi bahwa parameter kritis dalam keausan *sliding* adalah medan tegangan di dalam kontak dan jarak *sliding* yang relatif antara permukaan kontak. Model ini sering dikenal sebagai hukum keausan Archard (*Archard's wear law*). Sebenarnya bentuk dasarnya pertama kali diterbitkan oleh Holm [16].

Model didasarkan pada pengamatan-pengamatan bersifat percobaan. Bentuk sederhana dari model keausan ini adalah:

$$\frac{V}{s} = k \frac{F_N}{H}$$
$$V = k_D \cdot F_N \cdot s \tag{3.1}$$

dimana  $V$  adalah volume material yang hilang akibat keausan,  $s$  adalah jarak *sliding*,  $F_N$  adalah beban normal,  $H$  adalah kekerasan dari material yang mengalami keausan,  $k$  adalah koefisien keausan tak berdimensi,  $k_D$  adalah koefisien keausan yang berdimensi. Koefisien keausan  $k$ , merupakan suatu konstanta yang disediakan untuk mencocokkan perhitungan antara teori dan pengujian.

Untuk aplikasi *engineering*, ketinggian keausan memiliki lebih banyak keuntungan, dibanding volume keausan. Maka Archard membagi kedua sisi dari persamaan (3.1) dengan daerah kontak yang terbentuk  $A$ , sehingga persamaan menjadi

$$\frac{h^w}{s} = k_D \cdot p \tag{3.2}$$

dimana  $h^w$  adalah tinggi keausan, dan  $p$  adalah tekanan kontak (*contact pressure*).

Proses keausan dapat dianggap sebagai suatu proses dinamik dan prediksi dari proses ini dapat dilihat sebagai sebuah permasalahan nilai awal. Model keausan kemudian bisa digambarkan sebagai suatu persamaan diferensial untuk keausan linier.

$$\frac{dh^w}{ds} = k_D \cdot p \quad (3.3)$$

### 3.2 Model keausan Sarkar [17]

Pada tahun 1980, Sarkar memodifikasi model keausan Archard dengan pertimbangan adanya suatu koefisien gesek antara permukaan yang saling bergesekan. Seperti yang didiskusikan sebelumnya, hubungan antara koefisien gesek dan tingkat keausan lebih kompleks. Meskipun begitu, Sarkar telah memodifikasi suatu model keausan yang menghubungkan antara koefisien gesek dengan volume yang hilang dari bahan. Model keausan ini adalah pengembangan model keausan Archard, sehingga menjadi:

$$\frac{V}{s} = k \cdot \frac{F_N}{H} \cdot \sqrt{1 + 3\mu^2} \quad (3.4)$$

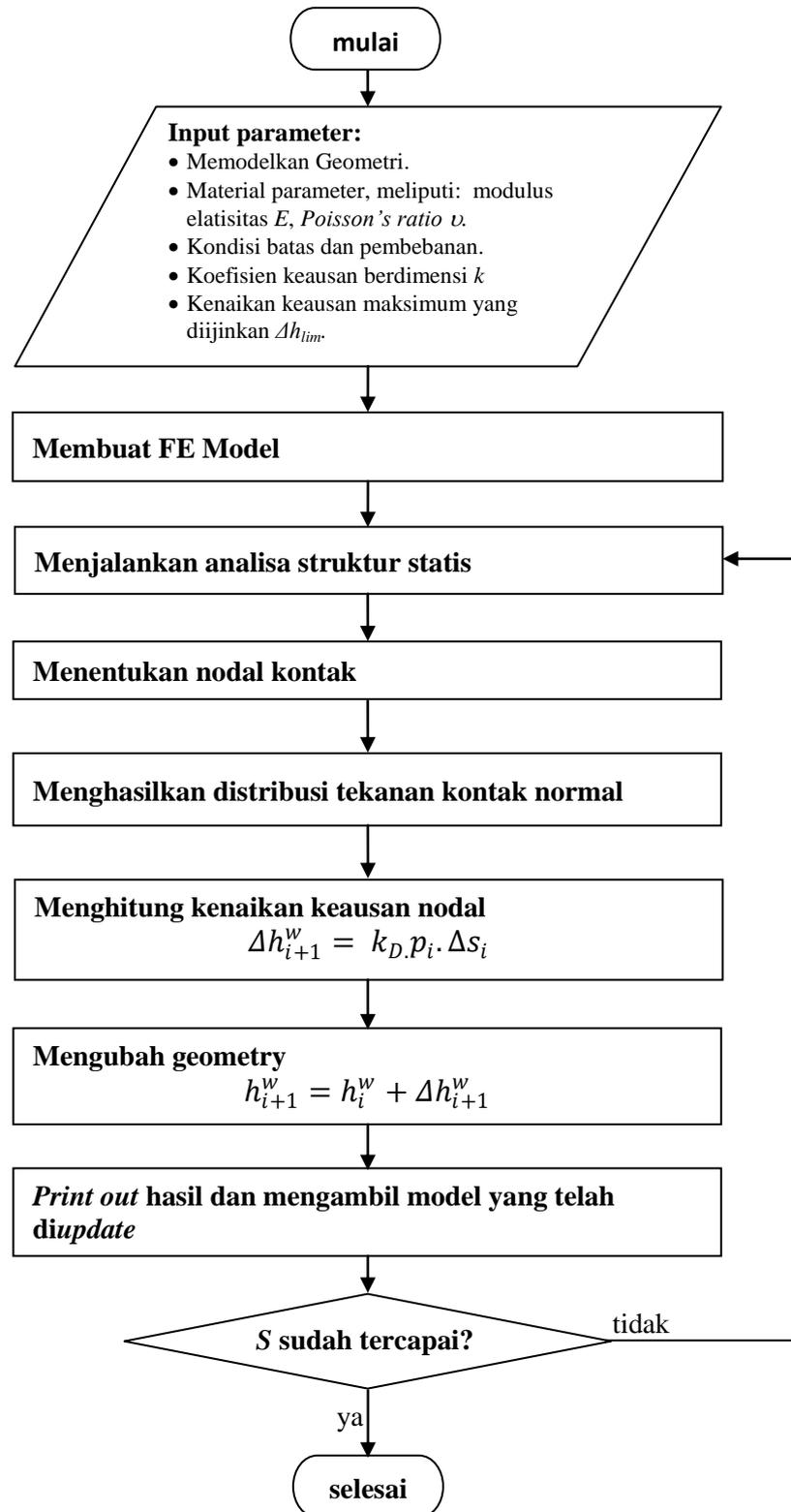
dimana  $\mu$  adalah koefisien gesek,  $V$  adalah volume material yang hilang akibat keausan,  $s$  adalah jarak *sliding*,  $F_N$  adalah beban normal,  $H$  adalah kekerasan dari material yang mengalami keausan,  $k$  adalah koefisien keausan tak berdimensi.

### 3.3 Metode prediksi keausan Podra [18]

Podra telah melakukan suatu perhitungan keausan dengan cara membandingkan antara hasil pengujian dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Tugas utama dari *FEM* adalah untuk menghitung tekanan kontak (*contact pressure*). Perhitungan keausan memakai *FEM* melibatkan penyelesaian masalah kontak secara umum antara benda yang saling kontak dengan menggunakan model dua dimensi (2D).

Diagram alir dari prosedur simulasi keausan memakai *FEM* ditunjukkan dalam Gambar 3.1. Diagram tersebut terdiri dari suatu rangkaian langkah-langkah solusi secara struktural yang dikombinasikan dengan perhitungan-perhitungan tambahan. Jadi pekerjaan perhitungan keausan melibatkan dua hal, yaitu mencari nilai (*contact pressure*),  $p$ , kemudian nilai tersebut dimasukkan ke dalam persamaan (3.2) sebagai nilai tekanan kontak,  $p$ . Langkah-langkah simulasi *FEM* adalah dengan menggambar

geometri model, menentukan sifat-sifat material, menentukan *loads*, menentukan kondisi batas (*constraints*) dan *solve*.



**Gambar 3.1.** Diagram alir simulasi keausan menggunakan *FEM*.

Setelah melakukan simulasi awal, maka dilakukan simulasi berikutnya dengan menggambar model baru kemudian memberikan beban dan kondisi batas (*constraints*) yang tepat. Saat menggambar model yang baru diusahakan sedemikian rupa sehingga didapatkan model yang nyata mungkin dengan benda aslinya disaat terdeformasi karena terjadi aus.

Daerah dengan gradien tegangan yang lebih tinggi dianjurkan untuk menggunakan *mesh* yang lebih rapat. Semakin banyak jumlah elemen di dalam model tersebut, akan semakin akurat pula hasil-hasilnya, tetapi berpengaruh pada meningkatnya waktu perhitungan dan penggunaan memori komputer.

Setelah solusi tegangan akibat kontak diperoleh, selanjutnya menentukan status dari tiap elemen kontak (yang terjadi kontak atau tidak). Koordinat-koordinat nodal kontak dari elemen yang terjadi kontak menggambarkan lokasi daerah kontak. *Nodal stress* dari titik di dalam daerah kontak merupakan distribusi tekanan kontak.

Metode Euler digunakan untuk mengintegrasikan hukum keausan berkenaan dengan waktu. Untuk tiap tahap simulasi keausan, parameter-parameter sistem diasumsikan konstan dan mendukung ketinggian keausan pada setiap titik nodal menurut penggambaran model keausan.

$$h_{i+1}^w = h_i^w + \Delta h_{i+1}^w \quad (3.5)$$

dimana,

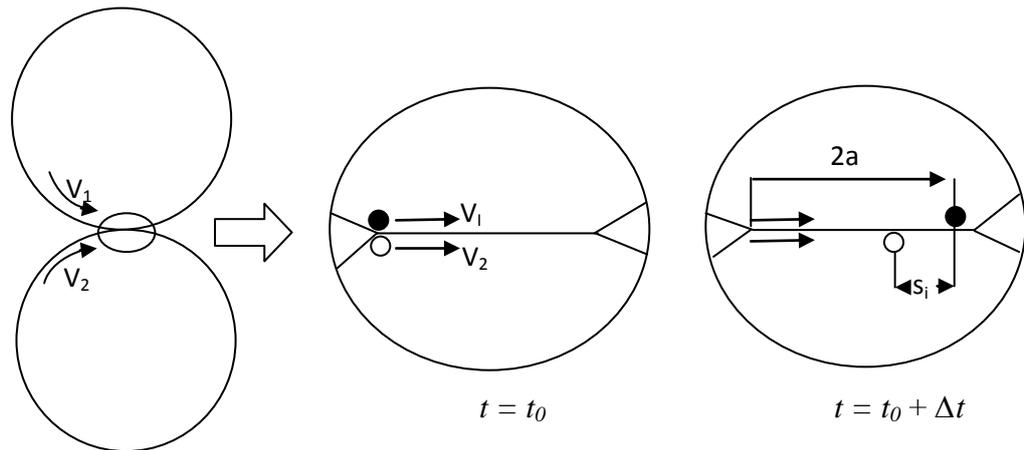
$$\Delta h_{i+1}^w = \text{kenaikan tinggi keausan (mm) pada titik } i+1$$

dengan diketahuinya distribusi tegangan, kenaikan tinggi keausan nodal  $\Delta h_{i+1}^w$  (mm) dapat dihitung.

### 3.4 Metode prediksi keausan Andersson [14]

Metode prediksi yang dilakukan Andersson berawal dari metode keausan dari Archard [15]. Dalam perhitungannya Andersson memodifikasi perhitungan Archard dengan memasukan jumlah number rotasi didalamnya. Dimana dalam rolling terjadi

sliding yang berbeda-beda untuk tiap rotasinya tergantung pada luas kontak area yang terbentuk. Untuk mendapatkan nilai keausan yang terjadi memasukan rotasi pada perhitungan tidak boleh terlalu besar karena apabila memasukan rotasi dengan jumlah rotasi yang besar, maka nilai keausan yang terjadi tidak akan bernilai akurat.



**Gambar 3.2.** Prinsip dasar untuk menentukan *sliding distance* pada *rolling* dan *sliding contact* [14 ].

Untuk mekanisme rolling terjadinya *slip* karena adanya perbedaan kecepatan linier antara dua benda yang saling kontak. Terlihat pada gambar 3.2 dimana  $V_1$  adalah kecepatan linier benda 1 dan  $V_2$  adalah kecepatan linier untuk benda 2. Untuk panjang jarak *sliding* adalah  $s_i$ .

$$s_i = 2a \cdot \frac{[V_1 - V_2]}{V_i} \quad (3.6)$$

dimana  $a$  adalah setengah dari lebar kontak yang terbentuk,  $V_1$  kecepatan untuk benda 1 dan  $V_2$  kecepatan untuk benda 2,  $i$  adalah faktor yang akan menunjukkan pemakaian benda tersebut, dengan  $i = 1$  merupakan benda dipilih untuk benda 1 dan  $i = 2$  merupakan benda dipilih adalah benda 2. Untuk menentukan jarak *sliding contact* dapat digunakan persamaan (3.6) pada *rolling*.

Untuk dua silinder yang berputar dengan radius  $R$ . Berputarnya benda tersebut disertai dengan pembebanan  $F_N$  dengan kecepatan sudut  $\omega_1$  dan  $\omega_2$ . Selanjutnya kecepatan sudut dirubah menjadi kecepatan linier  $V_1 = \omega_1 \cdot R$  dan  $V_2 = \omega_2 \cdot R$ . Kemudian keausan dapat dihitung.

$$\frac{dh_i}{dt} = k_D \cdot p \cdot V_{s,i} \quad (3.7)$$

dimana  $i = 1$  untuk benda 1 dan  $i = 2$  untuk benda 2.  $h_i$  merupakan kedalaman aus yang terjadi pada titik  $i$ ,  $k_D$  adalah wear koeficient untuk point pada benda  $i$ ,  $p$  adalah lokal contact pressure dan  $V_{s,i}$  adalah kecepatan sliding point  $i$ . Untuk kecepatan sliding dapat dihitung dengan.

$$V_{s,i} = [V_1 - V_2] \quad (3.8)$$

Dengan asumsi benda berputar dengan pembebanan dan kecepatan sudut yang bernilai konstan. Nilai keausan akan diperoleh dari hasil intergral:

$$h_i = k_D \cdot [V_1 - V_2] \cdot \int_0^t p dt \quad (3.9)$$

*Contact pressure*,  $p$ , dapat kita ganti dengan nilai *contact pressure* rata-rata,  $p_m$ . Penentuan kedalaman aus ini dapat digunakan untuk seluruh simulasi untuk revolusi keseluruhan putaran benda. Dengan metode integral dapatdigunakan perhitungan keausan:

$$h_{i_{new}} = h_{i_{old}} + k_D \cdot p_m \cdot [V_1 - V_2] \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

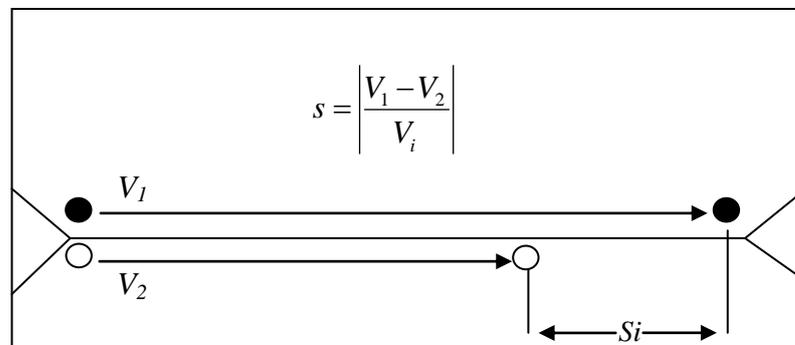
Jika nilai  $\Delta t$  sangat kecil maka dapat pula menggunakan perhitungan dengan menggunakan nilai dari jarak kontak area yang terbentuk dan merubah faktor waktu dengan jumlah rotasi,  $n_1$  yang diinginkan seperti perhitungan 3.11 yaitu:

$$h_{i/longtime} = k_D \cdot p_m \cdot \frac{|V_1 - V_2|}{V_i} \cdot 2a \cdot n_1 \quad (3.11)$$

Dalam mencari perbedaan selisih kecepatan linier antara benda satu dan benda dua yang disebut *slip* tak berdimensi digunakan metode perhitungan:

$$s = \left| \frac{V_1 - V_2}{V_i} \right| \quad (3.12)$$

dimana  $V_1$  merupakan kecepatan linier dari *disc* 1 dan  $V_2$  adalah kecepatan linier dari *disc* 2. Jarak *sliding* terjadi akibat adanya perbedaan kecepatan antara *disc* 1 dengan *disc* 2 yang disebabkan adanya *slip*. Nilai *slip* yang semakin besar akan mempengaruhi nilai tinggi keausan pada *disc*. Jarak *sliding* saat dua buah benda yang saling kontak permukaan berbanding lurus dengan nilai *slip*, terlihat dalam gambar (3.3) berikut:



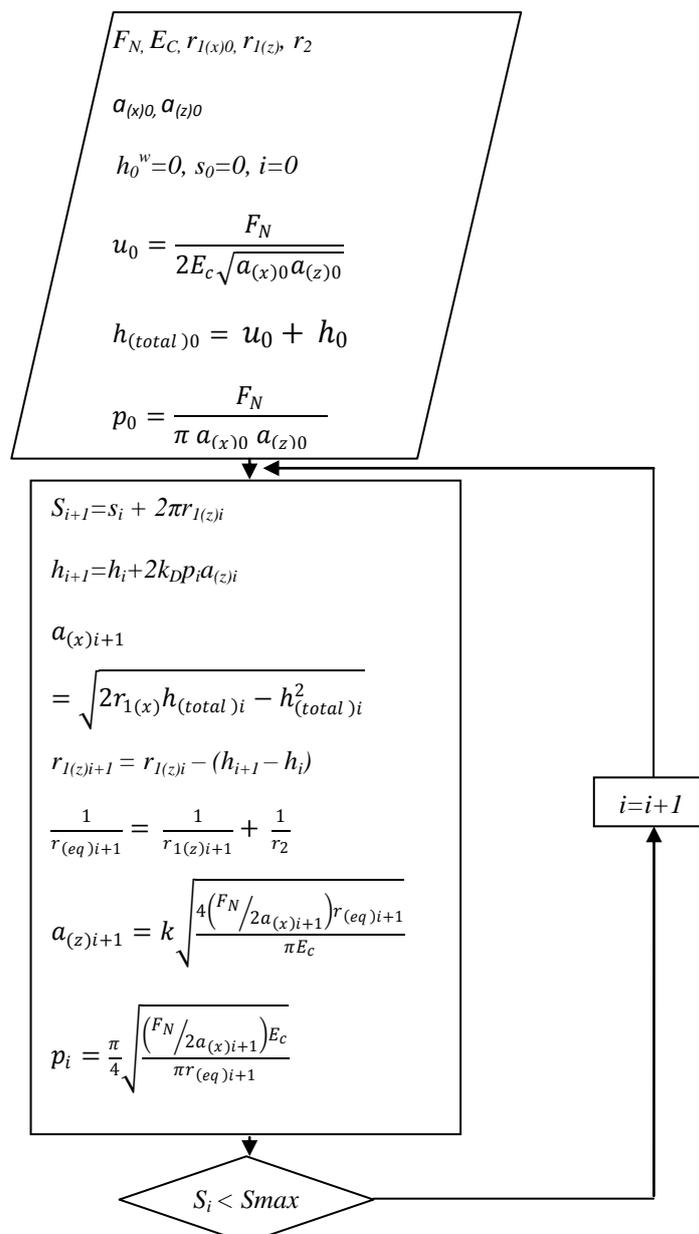
**Gambar 3.3.** *Slip* yang terjadi pada *rolling-sliding contact*.

Apabila sistem yang mengalami kontak *rolling-sliding* tidak terjadi *slip* maka tiap titik kontak permukaan tidak akan mengalami perubahan saat *disc* 1 dengan *disc* 2 berputar, dengan demikian benda yang saling mengalami kontak permukaan tersebut tidak mengalami *sliding*, sehingga dapat dikatakan bahwa benda tersebut tidak mengalami keausan.

### 3.5 Metode prediksi keausan Hegadekatte [19]

#### 3.5.1 Metode analitik

*Global incremental wear model (GIWM)* adalah sebuah metode pendekatan nilai keausan secara analitik yang ditawarkan oleh Hegadekatte. Istilah “*global*” digunakan untuk menunjukkan bahwa skema pemodelan keausan ini hanya mempertimbangkan jumlah secara menyeluruh (*global*), seperti tekanan kontak rata-rata dan bukan jumlah yang lebih spesifik pada suatu lokasi, misal tekanan kontak lokal.



**Gambar 3.4.** Diagram alir simulasi keausan *disc* menggunakan *GIWM*.

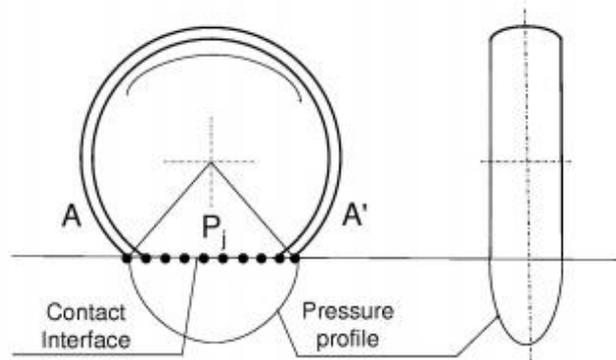
### 3.5.2 Metode elemen hingga (FEM)

Hegadekatte telah membuat sebuah metode perhitungan keausan menggunakan metode elemen hingga yang merupakan pengembangan dari metode elemen hingga yang telah dilakukan oleh Andersson [14]. Perbedaan paling mendasar antara metode elemen hingga Hegadekatte dengan Andersson adalah dalam perhitungannya Hegadekatte menggunakan  $\Delta t$  untuk setiap tahap kenaikan keausan yang terjadi sedangkan Andersson menggunakan jumlah number rotasi pada kenaikan keausannya.

Secara konsep, langkah-langkah yang dilakukan oleh Hegadekatte dalam penggunaan elemen hingga adalah sama dengan yang dilakukan oleh Andersson. *FEM* untuk mengetahui nilai tekanan kontak (*contact pressure*). Dimana ketika melakukan simulasi terdapat dua benda yang dimodelkan kemudian kita masukan parameter yang akan disimulasikan. Benda tersebut dalam simulasi tidak digerakan namun salah satu benda dibuat rigid. Dan simulasi yang dilakukan adalah melakukan tekanan statis untuk mendapatkan kontak area yang terbentuk dari simulasi penekanan tersebut dan nilai *contact pressure* rata-rata yang didapatkan akan dimasukan dalam perhitungan analitik sehingga nilai keausan pun akan dapat diketahui.

### 3.6 Metode prediksi keausan Kanavalli [20]

Kanavalli telah melakukan suatu perhitungan keausan *rolling sliding* dengan cara membandingkan antara hasil pengujian dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Tugas utama dari *FEM* adalah untuk menghitung tekanan kontak (*contact pressure*). Dimana ketika melakukan simulasi terdapat dua benda yang dimodelkan kemudian kita masukan parameter yang akan disimulasikan. Benda tersebut dalam simulasi tidak digerakan namun salah satu benda dibuat rigid. Dan simulasi yang dilakukan adalah melakukan tekanan statis untuk mendapatkan kontak area yang terbentuk dari simulasi penekanan tersebut dan nilai kontak presure rata-rata yang didapatkan akan dimasukan dalam perhitungan analitik sehingga nilai keausan pun akan dapat diketahui.



**Gambar 3.5.** Gambar menunjukkan posisi yang berbeda diasumsikan oleh titik nodal referensi [20].

Pertimbangan referensi titik nodal A sampai A', pada permukaan atas dari *disc*, yang kontak dengan *disc* bawah. Karena *disc* berputar, tekanan kontak pada titik nodal ini meningkat dari nol sampai maksimum dan kemudian menurun secara bertahap menjadi nol (lihat Gambar 3.4). Titik nodal mengalami tekanan yaitu ketika bergerak melalui kontak *interface*. Oleh karena itu, tekanan bekerja pada titik ini di sepanjang jarak geser yang merupakan keliling *disc*. Untuk satu rotasi dari *disc*, keausan berlangsung pada titik nodal ini, pada *disc* atas, dapat ditulis dengan persamaan,

$$h_{i+1} = h_i + k_D \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} p_j R_{1j} d\theta \quad (3.13)$$

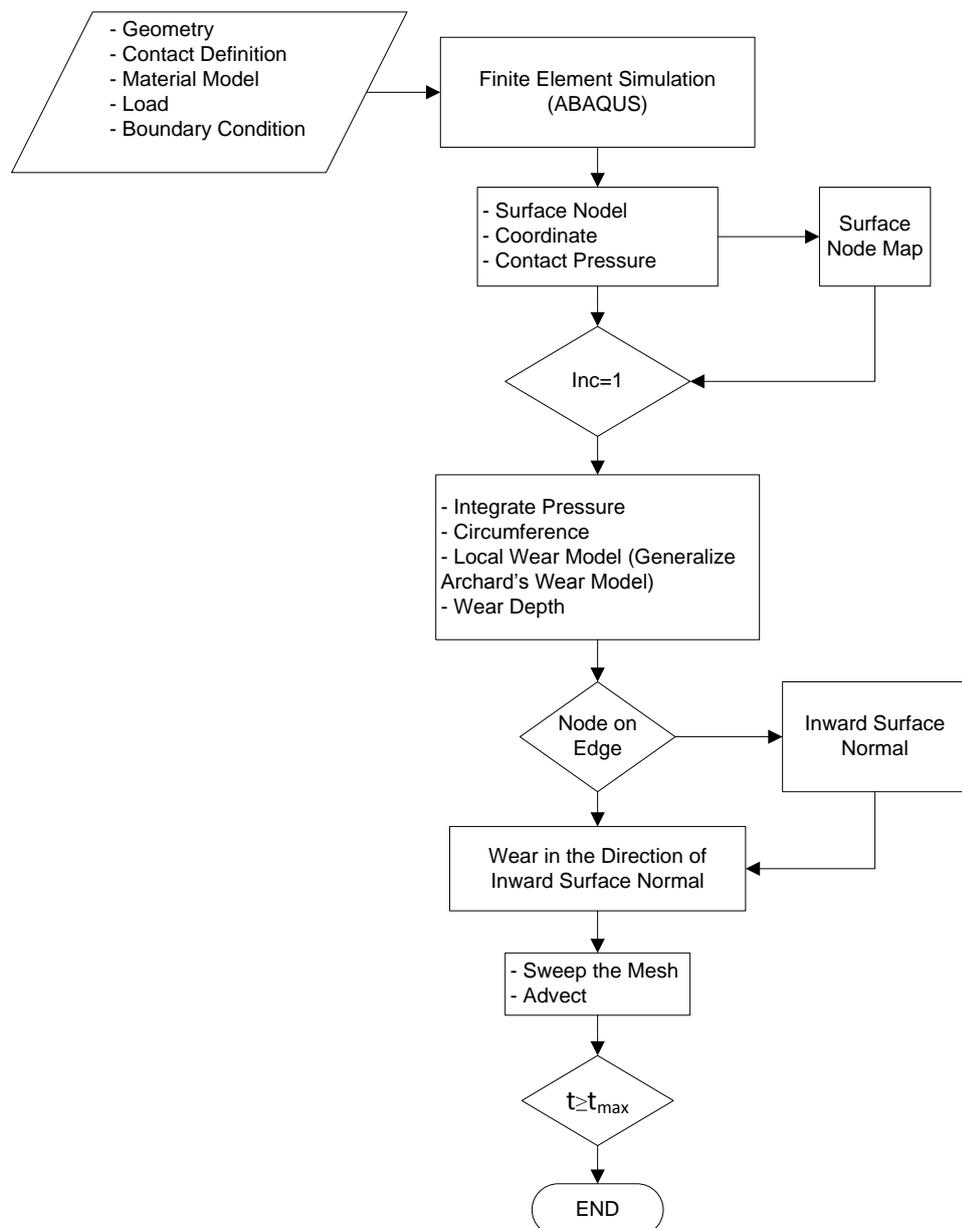
Dimana  $\theta$  adalah koordinat keliling dari *disc*, simbol  $j$  untuk posisi yang menempati selama *disc* berputar dengan perubahan sudut  $d\theta$ ,  $R_{1i}$  adalah radius *disc* yang atas pada kenaikan keausan  $i^{th}$ . Untuk menentukan kenaikan waktu,  $\Delta t$ , *disc* atas dibua  $\frac{\Delta t |(V_1 - V_2)|}{2\pi R_{1i}}$  rotasi. Dimana  $V_1$  dan  $V_2$  adalah kecepatan *disc* atas dan *disc* bawah.

Kemudian untuk sebuah kenaikan waktu dari  $\Delta t_i$ , adalah,

$$h_{i+1} = h_i + k_D \frac{\Delta t_i |(V_1 - V_2)|}{2\pi R_{1i}} \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} p_j R_{1j} d\theta \quad (3.14)$$

Ini adalah model keausan Archard yang digunakan dalam permasalahan kontak *rolling-sliding*. Pada persamaan 3.5 disebut sebagai “*generalized Archard’s wear model*”. Kedalaman keausan dihitung menggunakan persamaan 3.5 untuk setiap permukaan titik nodal.

Diagram alir dari prosedur simulasi keausan memakai *FEM* ditunjukkan dalam Gambar 3.5.



**Gambar 3.6.** Diagram alir simulasi keausan dalam *twin-disc tribometer*.

Setelah melakukan simulasi awal, maka dilakukan simulasi berikutnya dengan menggambar model baru kemudian memberikan beban dan kondisi batas (*constraints*) yang tepat. Saat menggambar model yang baru diusahakan sedemikian rupa sehingga didapatkan model yang senyata mungkin dengan benda aslinya disaat terdeformasi karena terjadi aus.

Daerah dengan gradien tegangan yang lebih tinggi dianjurkan untuk menggunakan *mesh* yang lebih rapat. Semakin banyak jumlah elemen di dalam model tersebut, akan semakin akurat pula hasil-hasilnya, tetapi berpengaruh pada meningkatnya waktu perhitungan dan penggunaan memori komputer.

Setelah solusi tegangan akibat kontak diperoleh, selanjutnya menentukan status dari tiap elemen kontak (yang terjadi kontak atau tidak). Koordinat-koordinat nodal kontak dari elemen yang terjadi kontak menggambarkan lokasi daerah kontak. *Nodal stress* dari titik di dalam daerah kontak merupakan distribusi tekanan kontak.

### **3.7 Metode prediksi keausan Rodriguez [21]**

Perhitungan numerik baru untuk simulasi keausan pada kontak 3D dan *rolling-contact problems*. Formulasi ini didasarkan pada *boundary element method (BEM)* untuk menghitung pengaruh koefisien elastisitas dan untuk pemenuhan kontak batas. *BEM* mempertimbangkan derajat kebebasan yang terjadi pada masalah semacam ini (padatan permukaan). Dalam perhitungan tinggi keausan terhadap suatu benda, *BEM* pun mengacu pada perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya dalam perhitungan tinggi keausan yang dilakukan oleh peneliti keausan Archard, *boundary element method* dapat digunakan untuk perhitungan tinggi keausan untuk benda yang mengalami *sliding*, *rolling* dan *rolling-sliding contact*. Beberapa prediksi perhitungan tinggi keausan oleh *BEM* sudah banyak divalidasikan dengan perhitungan tinggi keausan yg telah dilakukan oleh beberapa peneliti keausan dan hasilnya sangat mendekati.

### **3.8 Ringkasan**

Setelah melihat beberapa studi pustaka pada bagian sub-bab sebelumnya, beberapa catatan penting dari hasil tinjauan pustaka ini adalah pada model keausan Archard 1953 mengusulkan suatu model pendekatan untuk mendeskripsikan keausan

*sliding*. Dia berasumsi bahwa parameter kritis dalam keausan *sliding* adalah medan tegangan di dalam kontak dan jarak *sliding* yang relatif antara permukaan kontak. Model ini sering dikenal sebagai hukum keausan Archard (*Archard's wear law*). Hukum ini digunakan untuk menghitung seberapa besar material yang hilang berdasarkan jarak sliding.

Pada tahun 1980, Sarkar memodifikasi model keausan Archard dengan pertimbangan adanya suatu koefisien gesek antara permukaan yang saling bergesekan. Seperti yang didiskusikan sebelumnya, hubungan antara koefisien gesek dan tingkat keausan lebih kompleks. Meskipun begitu, Sarkar telah memodifikasi suatu model keausan yang menghubungkan antara koefisien gesek dengan volume yang hilang dari bahan.

Podra telah melakukan suatu perhitungan keausan dengan cara membandingkan antara hasil pengujian dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*. Perhitungan keausan memakai *FEM* melibatkan penyelesaian masalah kontak secara umum antara benda yang saling kontak dengan menggunakan model dua dimensi (2D). Metode Euler digunakan untuk mengintegrasikan hukum keausan berkenaan dengan waktu. Untuk tiap tahap simulasi keausan, parameter-parameter sistem diasumsikan konstan dan mendukung ketinggian keausan pada setiap titik nodal menurut penggambaran model keausan.

Metode prediksi yang dilakukan Andersson berawal dari metode keausan dari Archard [15]. Dalam perhitungannya Andersson memodifikasi perhitungan Archard dengan memasukan jumlah number rotasi didalamnya. Dimana dalam rolling terjadi sliding yang berbeda-beda untuk tiap rotasinya tergantung pada luas kontak area yang terbentuk. Untuk mendapatkan nilai keausan yang terjadi memasukan rotasi pada perhitungan tidak boleh terlalu besar karena apabila memasukan rotasi dengan jumlah rotasi yang besar, maka nilai keausan yang terjadi tidak akan bernilai akurat

Hegadekatte telah membuat sebuah metode perhitungan keausan menggunakan dua metode, metode yang pertama adalah metode analitik yaitu *Global incremental wear model (GIWM)* adalah sebuah metode pendekatan nilai keausan secara analitik yang ditawarkan oleh Hegadekatte. Istilah "*global*" digunakan untuk menunjukkan bahwa skema pemodelan keausan ini hanya mempertimbangkan jumlah secara

menyeluruh (*global*), seperti tekanan kontak rata-rata. Metode yang kedua menggunakan metode elemen hingga yang merupakan pengembangan dari metode elemen hingga yang telah dilakukan oleh Andersson. Perbedaan paling mendasar antara metode elemen hingga Hegadekatte dengan Andersson adalah dalam perhitungannya Hegadekatte menggunakan  $\Delta t$  untuk setiap tahap kenaikan keausan yang terjadi sedangkan Andersson menggunakan jumlah number rotasi pada kenaikan keausannya.

Kanavalli melakukan suatu perhitungan keausan yang manegadopsi dari percobaan *pin-on-disc* yang pernah dilakukan oleh Hegadekatte menggunakan *FEM*. Tugas utama dari *FEM* adalah untuk menghitung tekanan kontak (*contact pressure*). Dimana ketika melakukan simulasi terdapat dua benda yang dimodelkan kemudian kita masukan parameter yang akan disimulasikan. Benda tersebut dalam simulasi tidak digerakan namun salah satu benda dibuat *rigid*. Dan simulasi yang dilakukan adalah melakukan tekanan statis untuk mendapatkan kontak area yang terbentuk dari simulasi penekanan tersebut dan nilai kontak *pressure* rata-rata yang didapatkan akan dimasukan dalam perhitungan analitik menggunakan persamaan *generalized Archard's wear model* sehingga nilai keausan pun akan dapat diketahui.

Metode prediksi keausan Rodriguez menggunakan perhitungan numerik baru untuk simulasi keausan pada kontak yang terjadi. Perhitungan numerik ini digunakan untuk simulasi keausan pada kontak 3D dan masalah *rolling-contact*. Formulasi ini didasarkan pada *boundary element method (BEM)* untuk menghitung pengaruh koefisien *elastic* dan untuk pemenuhan kontak batas. Dalam perhitungan tinggi keausan terhadap suatu benda, *BEM* pun mengacu pada perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya dalam perhitungan tinggi keausan yang dilakukan oleh peneliti keausan Archard, *BEM* dapat digunakan untuk perhitungan tinggi keausan untuk benda yang mengalami *sliding*, *rolling* dan *rolling-sliding contact*. [15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]