

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sambungan tulang pinggul (*hip joint*)

Sambungan tulang pinggul merupakan suatu sambungan tulang yang berlokasi diantara pangkal tulang paha atas dan pinggul. Sambungan tulang pinggul dari manusia terdiri dari tiga bagian utama yaitu *femoral head*, *Socket* dan femur.



Gambar 2.1 Bagian-bagian sambungan tulang pinggul normal (IOS 2016)

Pada sambungan tulang pinggul normal (Gambar 2.1) terdapat bagian jaringan lembut dan tipis yang dinamakan selaput sinovial (*synovial*). Selaput ini berfungsi sebagai penghasil cairan lubrikasi dan dengan ini hampir menghilangkan efek dari gesekan pada sambungan tulang pinggul. Permukaan dari tulang memiliki suatu lapisan tulang rawan (*articular cartilage*) yang merupakan suatu bantalan lembut serta membuat gerak tulang dapat bergerak leluasa dengan mudah. Lapisan ini dapat mengeluarkan lubrikasi dan mengurangi gesekan yang terjadi pada sambungan tulang pinggul. Akibat dari gerakan dan gesekan yang selalu terjadi tiap hari, maka lapisan tulang rawan juga semakin rusak dan dapat menyebabkan artritis

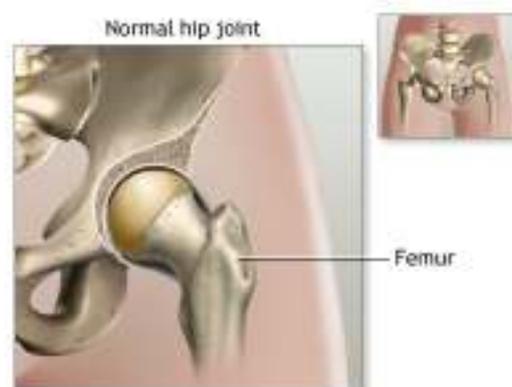
(*arthritis*) seperti pada (Gambar 2.2). Selain akan menimbulkan rasa sakit, ini juga akan menyebabkan gerakan dari sambungan tulang pinggul menjadi tidak leluasa, terkadang berbunyi ataupun bahkan bisa menimbulkan pergeseran posisi normal. Lalu kemudian, sambungan tulang pinggul harus ditukar dengan sambungan tulang pinggul buatan (*artificial hip joint replacement*). (Orthopedic 2013)



Gambar 2.2 Bagian-bagian *hip arthritis* pada *hip joint* (GOSM 2014)

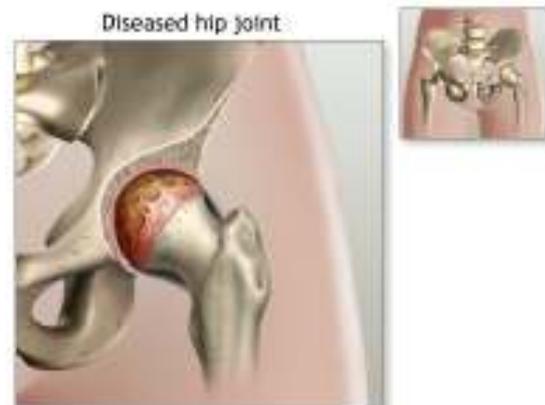
2.2 Gambaran umum tulang pinggul buatan (*hip joint replacement*)

Gambar dibawah ini dapat menunjukkan mengenai sambungan tulang pinggul normal serta kemungkinan indikasi terjadi sebuah radang sendi dan tahapan proses dari pergantian sambungan tulang pinggul.



Gambar 2.3 Sambungan tulang pinggul normal (MedlinePlus 2016)

Dari (Gambar 2.3) memperlihatkan sebuah anatomi dari sambungan tulang pinggul yang normal. *femoral head* masih memiliki lapisan tulang rawan yang sehat, yang dianggap masih sanggup menghasilkan cairan yang dapat melumasi dan mengurangi efek dari gesekan pada sambungan tulang pinggul.



Gambar 2.4 Indikasi terjadinya artritis (MedlinePlus 2016)

Pada (Gambar 2.4) menunjukkan lapisan tulang rawan di *femoral head* telah mengalami penurunan, inilah yang dapat mengakibatkan terjadinya radang. (Gambar 2.5 dan Gambar 2.6) merupakan visual dari penggantian sambungan tulang pinggul asli dengan sambungan tulang pinggul tiruan (*hip joint prosthesis*). Gambar 2.5 menunjukkan pemotongan femur, yang kemudian diganti dengan sambungan tulang pinggul tiruan melalui cara penanam stem pada bagian tulang femur dan *cup* pada acetabular.



Gambar 2.5 Pemotongan tulang femur dan pemasangan (MedlinePlus 2016)

Gambar 2.6 merupakan gambaran perbandingan antara *hip joint* yang belum dilakukan penggantian sambungan tulang dan setelah dilakukan penggantian sambungan tulang.



Gambar 2.6 *Hip joint* sebelum dan sesudah dilakukan pergantian sambungan tulang pinggul buatan (MedlinePlus 2016)

2.3 Komponen tulang pinggul buatan (*artificial hip joint*)

Komponen dari sambungan tulang pinggul ini terdiri dari bagian *acetabular cup* dan *femoral head*. Dalam acetabular terbagi beberapa komponen yaitu *acetabular shell* dengan *acetabular liner*, sedangkan untuk bagian femoral terdiri dari komponen *femoral head* dengan *femoral stem*.

Acetabular shell yaitu merupakan bagian terluar dari *hip joint prosthesis* sebagai *cup* yang melekat pada komponen acetabulum (bagian tulang pelvis), pada permukaan luar dari *acetabular shell* terdapat bagian permukaan kasar mirip seperti jaring-jaring (*porous*) yang berfungsi sebagai suatu perangsang tulang agar dapat tumbuh dan melekat pada bagian *acetabular shell* secara alami, juga untuk penguat *acetabular shell* yang ditanamkan baut secara permanen.

Acetabular cup berfungsi sebagai penopang *femoral head* yang menempel pada bagian *acetabular shell*. *Femoral head* sendiri juga merupakan implan yang digunakan sebagai pengganti dari bonggol tulang femur yang telah dinyatakan

secara medis rusak dikarenakan oleh suatu penyebab, baik itu dikarenakan penyakit ataupun sebab lainnya (MEDIMSA 2016).



Gambar 2.7 Komponen sambungan tulang pinggul buatan (MEDIMSA 2016)

2.4 Jenis-jenis material pada *artificial hip joint*

2.4.1 Bantalan hip (*hip bearing*)

bantalan hip (*hip bearing*) dari sambungan tulang pinggul buatan ini dapat diklasifikasikan kedalam 4 kelompok berdasarkan tujuan maupun pengaplikasiannya diantaranya :

1. *Metal-on-plastic* (Me-on-PE).
2. *Metal-on-metal* (Me-on-Me).
3. *Ceramic-on-Ceramic* (C-on-C).
4. *Ceramic-on-plastic* (C-on-PE).

Material bantalan pada *metal-on-plastic* adalah kombinasi bahan yang telah lama di pakai dan diuji. Sejak John Charnley menemukan pengaplikasian dibidang ortopedi dengan menggunakan *polythylene* dengan densitas yang tinggi, material ini cocok untuk diaplikasikan kehampir semua permukaan bantalan lainnya. Plastik

yang saat ini digunakan sebagai bantalan pada *artificial hip joint* adalah *Ultra-High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) dan *Ultra-high cross-linked polyethylene* (XLPE), kedua bahan ini sangat handal dan stabil serta hemat biaya (Knight et al., 2011).

Meskipun kemajuan penelitian tentang *polyethylene* dari tahun 1950-an, kombinasi material ini dikenal dengan tingkat keausan material yang tinggi dibandingkan dengan bantalan lainnya. Partikel keausan yang ditimbulkan oleh *polyethylene* mengakibatkan infeksi pada tulang paha dan pinggul dan akhirnya menimbulkan penyakit osteolisis.



Gambar 2.8 *Metal-on-plastic hip bearing* (Knight et al., 2011)

Pada bantalan *metal-on-metal* baik pada *femoral head* maupun *acetabular liner*, terbuat dari material yang mempunyai sifat tahan terhadap keausan (*wear resistant*) seperti paduan kobalt kromium molibdenum (CoCrMo). Cr-Co-Mo merupakan material paduan yang paling terkenal, dengan senyawa molibdenum sebagai tambahan pada Cr-Co dapat meningkatkan ketahanan terhadap keausan serta meningkatkan kekerasan. Material ini jauh lebih tahan terhadap keausan dibandingkan segala bentuk *polythelene* sehingga bantalan ini paling sering digunakan oleh ahli bedah (Knight et al., 2011).

Pada bantalan *metal-on-metal* sedikit kontroversial dalam dunia ortopedi karena bukti yang menunjukkan bahwa bantalan ini dapat menyebabkan keracunan atau *metallosis*. Ketika komponen bantalan bergesekan dan menyebabkan keausan, menghasilkan partikel yang dikenal sebagai ion logam. Ion ini diserap ke dalam aliran darah sehingga menyebabkan kerusakan pada jaringan sekitarnya, tulang, dan

sistem syaraf. Seiring waktu dapat menyebabkan kerusakan pinggul dan akhirnya terjadi kegagalan pada implan.



Gambar 2.9 *Metal-on-metal hip bearing* (Knight et al., 2011)

Pada bantalan *ceramic-on-ceramic* dianjurkan pada individu yang sangat aktif dan lebih muda secara fisik dikarenakan tingkat keausan yang sangat rendah. Alumina atau Aluminium Oksida (Al_2O_3) dan Zirkonium Oksida (ZrO_2) merupakan salah satu bahan alternatif yang dapat digunakan sebagai biomaterial karena sifatnya yang *bioinert* dimana keramik tidak berpengaruh dan berinteraksi dengan jaringan tubuh. Kekhawatiran yang paling utama dengan *ceramic-on-ceramic bearing* pada sambungan tulang pinggul buatan adalah kemungkinan adanya retak, gempil dan menimbulkan suara mendecit (Knight et al., 2011).



Gambar 2.10 *Ceramic-on-ceramic hip bearing* (Knight et al., 2011)

Pada bantalan *ceramic-on-plastic* adalah jenis bantalan pada *artificial hip joint* yang terdiri dari *femoral head* (keramik) dan *acetabular cup* (plastik). Keunggulan dari bantalan ini adalah kekerasannya yang tinggi dibandingkan dengan *C-on-C*. Selain itu, bantalan ini diaplikasikan kepada pasien yang muda

dimana menggunakan *uncemented acetabular shell* untuk mencegah keropos pada tulang dari acetabulum (Knight et al., 2011).



Gambar 2.11 *Ceramic-on-plastic hip bearing* (Knight et al., 2011)

2.4.2 Stem

Karakteristik yang paling utama sifat komponen batang pada *artificial hip joint* adalah kekuatan, kekerasan maupun ketangguhan. Material logam adalah bahan yang paling cocok untuk diaplikasikan karena memiliki modulus elastisitas yang tinggi serta ulet sehingga memiliki ketahanan yang baik terhadap kelelahan (*fatigue*). Pada material keramik atau yang lainnya memiliki tingkat keuletan yang rendah. Pada material plastik tidak cocok digunakan sebagai bahan untuk membuat stem pada komponen *artificial hip joint* dikarenakan memiliki resistensi yang rendah terhadap kelelahan. *Stainless steel* dijadikan pilihan yang terbaik dikarenakan memiliki resistensi yang tinggi terhadap korosi, kekerasan dan kekuatan. *Stainless steel* adalah paduan nikel sehingga memiliki kekurangan yang dapat menimbulkan risiko pada pasien yang memiliki alergi terhadap nikel. *Stainless steel* memiliki modulus elastisitas yang tinggi dimana tegangan yang dihasilkan akibat pembebanan dapat ditransmisikan sepanjang batang sama halnya pada tulang paha (DoITPoMS 2014).

Co-Cr-Mo juga sebagai material alternatif batang stem pengganti *stainless steel* karena ketahanan terhadap keausannya serta kekuatannya yang tinggi, tetapi kekerasannya membuatnya sulit untuk proses permesinan. Sebagian pasien yang menggunakan implan ini akan memiliki reaksi alergi terhadap kobalt dan krom. Kelemahan lain dari Co-Cr-Mo adalah risiko keracunan logam (DoITPoMS 2014).

Paduan titanium menjadi material induk yang paling umum karena kekuatannya yang tinggi, kekerasan, serta ketahanan terhadap korosi serta biokompatibilitas. Dari semua logam, titanium dianggap sebagai bahan yang biokompatibel karena kemampuannya untuk tetap lembam dalam tubuh dan digunakan pada *uncemented* batang. Titanium yang memiliki kekuatan yang tinggi dan nilai modulus young yang mendekati tulang alami. Unsur aluminium dan vanadium sebanyak 6 dan 4 persen pada berat masing-masingnya digunakan untuk meningkatkan ketangguhan dan meningkatkan resistensi terhadap kelelahan. Paduan titanium ini dikenal dengan Ti-6Al-4V. Kelemahan dari titanium ini adalah biayanya hampir 3 kali lebih mahal daripada bahan *stainless steel* untuk ukuran stem yang sama. Sebuah keuntungan yang besar dengan titanium adalah kemampuan untuk dapat mengontrol porositas dalam suatu proses manufaktur, sehingga porositas 40% menciptakan bahan dengan sifat sangat mirip dengan struktur tulang paha yang dikenal sebagai Ti-6Al-5V 40% porositas (DoITPoMS 2014).

2.5 Studi teoritis tribologi pada *artificial hip joint*

Studi teoritis tentang tribologi pada *artificial hip joint* menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan dengan pendekatan secara eksperimental. Hal ini memerlukan waktu yang relatif singkat untuk mengembangkan model teoritis dan efektivitas biaya untuk melakukan analisis dengan teori. Oleh karena itu, model teoritis sangat cocok untuk untuk melihat parameter dalam menganalisa suatu desain dan mengidentifikasi mekanisme yang mendasari bila dikombinasikan dengan studi eksperimental. Hal ini juga berguna untuk mengeksplorasi suatu kajian yang tidak dapat langsung diselesaikan dengan metode ekperimental. Misalnya, pengujian dengan menggunakan simulator dengan 50 juta siklus, hal ini bisa memakan waktu hingga 5-10 tahun untuk menyelesaikannya dan ini merupakan suatu hal yang tidak praktis. Namun, pemodelan dengan memakai komputasi dapat memberikan jalan alternatif. Pemodelan secara teoritis semakin banyak digunakan

pada *artificial hip joint* karena perkembangan yang signifikan dari ketersediaan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Meskipun ada sejumlah keuntungan untuk model secara teoritis, penelitian secara ekperimental sama-sama penting, tidak hanya memberikan masukan parameter yang diperlukan untuk model teoritis tetapi juga untuk validasi. Secara khusus, analisis teori pada *artificial hip joint* melibatkan mekanika kontak, pelumasan, serta keausan. Metode numerik biasanya digunakan untuk memecahkan model teoritis. Meskipun metode beda hingga (*Finite difference method*) dapat digunakan, namun metode elemen hingga sangat berguna dalam mempertimbangkan geometri yang kompleks dan bahan properti. Ada banyak perangkat lunak yang tersedia diantaranya Abaqus maupun SolidWorks. Namun untuk masalah pelumasan yang kompleks yang melibatkan pada mekanika padat dan fluida, tidak dapat langsung ditangani baik oleh FEM atau FDM sehingga perlu adanya kombinasi antara kedua metode tersebut (Jin, 2011).

2.5.1 Mekanika kontak pada *artificial hip joint*

Mekanika kontak mengacu pada dua buah benda yang saling bersentuhan sehingga menimbulkan kontak. Mekanika kontak pertama kali dikembangkan oleh Hertz pada tahun 1880 dengan referensi lensa optik (Hertz *et al.*, 1896). Studi tentang mekanika kontak umumnya mempelajari tentang tekanan kontak, baik dari permukaan suatu bantalan dengan komponen dan bidang kontak. Pendekatan umum untuk mempelajari tentang mekanika kontak adalah baik melalui kajian eksperimental dan komputasi. Simulasi dengan metode komputasi yang sering digunakan adalah metode beda hingga (Jin, 2000) atau yang lebih sering digunakan adalah metode elemen hingga (Liu *et al.*, 2005). Penentuan tekanan kontak pada *artificial hip joint* bukanlah suatu hal yang mudah, baik secara ekperimental maupun komputasi. Namun hubungan sederhana ini dapat digunakan dimana tekanan kontak rata-rata (P) adalah beban (W) dibagi dengan luas area kontak (A) : (Jin, 2000)

$$P = \frac{W}{A} \quad (2.1)$$

Dimana:

P = Tekanan kontak rata rata (N/mm^2)

W = Gaya (N)

A = Luas area kontak (mm^2)

Oleh karena itu, peningkatan bidang kontak umumnya mengarah pada penurunan tekanan kontak. Studi tentang mekanika kontak dalam *artificial hip joint* sangat erat terkait dengan tribologi dimana tekanan pada permukaan bantalan merupakan parameter untuk mengkaji tentang tribologi secara keseluruhan. Mekanikal kontak merupakan pertimbangan yang sangat penting dalam mendesain *artificial hip joint* (Bartel, Burstein, Toda, & Edwards, 1985).

2.5.2 Friksi (*friction*)

Friksi merupakan suatu gaya yang menahan gerakan geser atau bergulir suatu benda terhadap yang lainnya. Friksi adalah faktor yang sangat penting dari suatu mekanisme operasi yang sebagian besar peralatan ataupun mesin.

1. Gaya gesekan (F) berbanding lurus dengan beban yang diberikan (W).
2. Gaya gesekan (F) tidak bergantung pada luas proyeksi permukaan yang bersentuhan.
3. Gaya gesekan tidak berhubungan dengan kecepatan sliding permukaan.

Jadi rasio dari friksi F terhadap beban W adalah tetap. Rasio tetap tersebut disebut koefisien friksi (*coefficient of friction*). Secara matematik persamaan dapat ditulis: (Blau, 1997)

$$\mu = \frac{F}{W} \text{ atau } F = \mu W \quad (2.2)$$

Dimana:

μ = Koefisien gesekan (tidak berdimensi)

F = Gaya gesek (N)

W = Beban (N)

2.5.3 Keausan (*wear*)

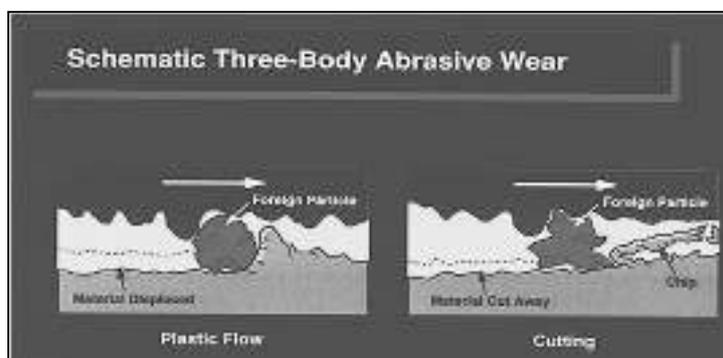
Keausan berdasarkan definisi ASTM adalah merupakan suatu kerusakan permukaan dari suatu benda yang secara umum berkaitan dengan peningkatan hilangnya material yang diakibatkan dari pergerakan relatif benda dan sebuah substansi kontak (Blau, 1997). Pentingnya keausan pada *artificial hip joint* menunjukkan tidak hanya dengan hilangnya keakuratan geometri pada bantalan sehingga menurunkan sifat tribologi dan fungsi kinematika tetapi juga konsekuensi biologis akibat dari partikel aus (Ingham & Fisher, 2005). Mekanisme dari aus terbagi menjadi dua bagian, yaitu keausan karena perilaku mekanis dan keausan karena perilaku kimiawi.

2.5.3.1 Keausan yang disebabkan perilaku mekanis (*mechanical*)

Keausan ini dapat dibagi atas *abrasive wear*, *adhesive wear*, *flow wear* dan *fatigue wear*. Penjelasan mengenai bagian-bagian ini antara lain sebagai berikut.

1. *Abrasive wear*

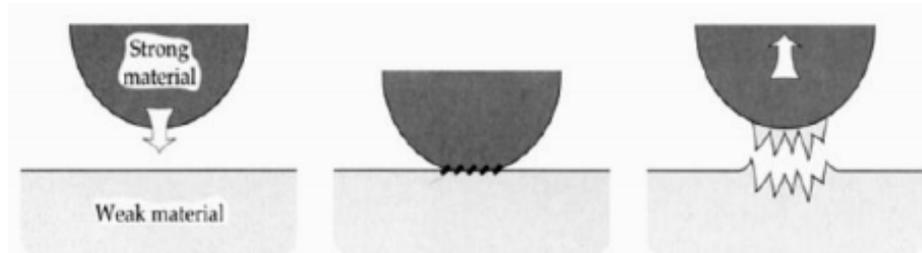
Keausan bisa terjadi apabila suatu partikel keras/permukaan yang kasar pada bagian kasar memotong dan menggerus bagian permukaannya sehingga terjadi hilangnya material yang ada pada permukaan tersebut (*earth moving equipment*). Contoh : *ploughing*, *micro-cutting* maupun *wedge forming*.



Gambar 2.12 *Abrasive wear* (Syafa'at, 2008)

2. *Adhesive Wear*

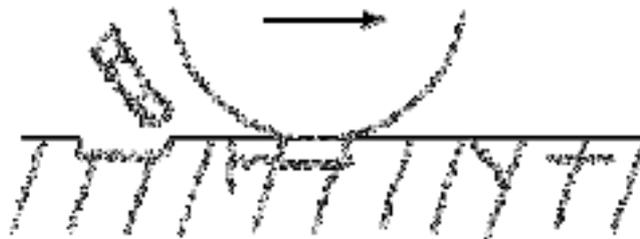
Proses ini akan terjadi apabila suatu partikel dari permukaan yang lebih lembut telah melekat/menempel pada bagian dari permukaan kontak yang lebih keras.



Gambar 2.13 *Adhesive wear* (Syafa'at, 2008)

3. *Fatigue Wear*

Terjadinya bagian keausan ini bisa didominasi karena adanya kondisi beban yang mengalami pengulangan (*cyclic loading*). Cirinya yaitu terjadi perambatan retak lelah, biasanya akan tegak lurus dipermukaan tanpa adanya deformasi plastis, contohnya: bantalan bola, bantalan *roller* maupun bentuk lainnya.



Gambar 2.14 *Fatigue wear* karena retak dibagian dalam dan merambat (Stachowiak, 2005)

Keausan fatik (*fatigue wear*) yang mengakibatkan retak pada bagian dalam dan merambat dalam dilihat pada Gambar 2.14. Sedangkan pada Gambar 2.15 menunjukkan bahwa permulaan retak akibat keausan fatik hingga mengakibatkan terbentuknya partikel keausan.



a. Awalan retak sebagai hasil dari proses kelelahan.



b. Retak primer menjalar pada sepanjang bidang slip.



c. Retak tambahan pada permukaan retak.



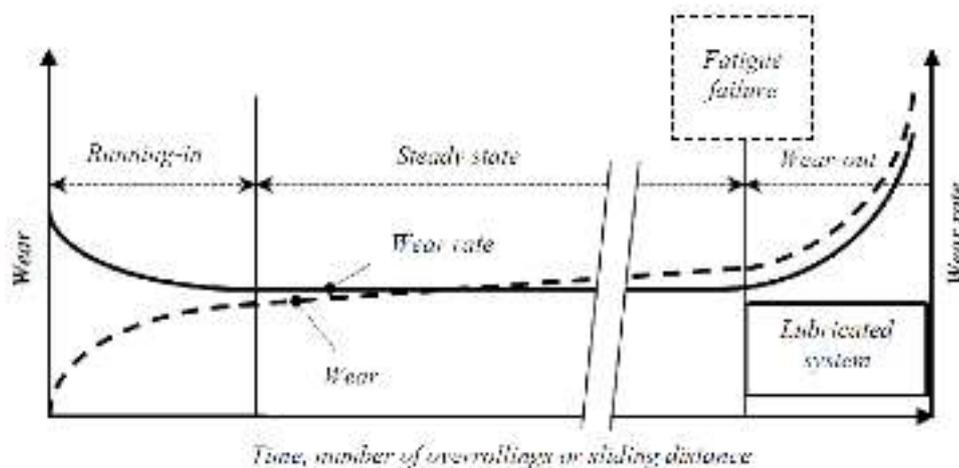
d. Tambahan retak merambat dan terbentuklah keausan.

Gambar 2.15 Skema penggambaran proses retak dari awal retak dan merambatnya retak permukaan (Stachowiak, 2005)

Pada dua buah permukaan yang akan mengalami kontak dibawah beban dan bergerak relatif dengan yang lain, akan menyebabkan terjadinya perubahan kondisi permukaan. Biasanya perubahan ini akan terdeteksi seperti pada perubahan dalam gesekan. Setelah keadaan ini selesai, gaya gesek akan mencapai kondisi yang kita sebut sebagai keadaan stabil (*steady state*). Perubahan yang terjadi pada saat

keadaan awal perkontakan dengan status *steady state* disebut sebagai *running-in*. Istilah lain sering dianggap juga sebagai *breaking-in* atau *wearing-in*. *Wearing-in* yaitu sebutan untuk perubahan kekasaran pada kondisi awal dan *steady state*, dengan berupa sampai pada geometri yang konformal dari kedua bagian permukaan yang saling bersinggungan kontak (Blau, 1989).

Tahapan pada saat keausan berhubungan dengan waktu pemakaian terbagi menjadi tiga tahap (Jamari, 2006). Tahap awal yaitu tahap *running-in*. Pada proses ini, keausan mengalami peningkatan signifikan namun laju keausan akan berkurang seiring bertambahnya waktu maupun *rolling* dan jarak *sliding* (Gambar 2.16).



Gambar 2.16 Tiga tahap keausan dan perilakunya (Jamari, 2006)

Tahap selanjutnya yaitu *steady state* dimana saat keausan masih meningkat namun tidak sebesar saat proses sebelumnya. Laju keausan (*wear rate*) mengalami kestabilan secara linier/konstan dan tidak berubah dengan berjalannya waktu maupun jarak *sliding*. Keadaan ini akan berakhir ketika terjadi *fatigue wear*. Sedangkan proses selanjutnya yaitu *wear-out*, dimana laju dari aus serta keausan mengalami peningkatan signifikan, sampai kemudian sebuah permukaan mengalami kerusakan. Pada tahap inilah kegagalan lelah mulai berawal.

2.6 Pemodelan Keausan

2.6.1 Model keausan Archard

Dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan juga teknologi, pemakaian perangkat lunak pada komputer guna proses simulasi keausan mulai dikembangkan, khususnya model (Archard, 1953). Archard mengemukakan sebuah model fenomenal yang menjelaskan mengenai *sliding wear*. Dalam model ini diasumsikan bahwa parameter kritis pada *sliding wear* yaitu tekanan kontak dan jarak sliding antara permukaan kontak. Persamaannya adalah: (Archard, 1953)

$$V = k \frac{F_N}{H} s \quad (2.3)$$

Dimana :

V = volume material yang hilang saat keausan.

s = jarak sliding.

F_N = beban pemakaian normal.

H = kekerasan material yang mengalami keausan.

k = koefisien keausan.

Koefisien keausan k merupakan suatu konstanta yang ada guna sebagai pencocokan perhitungan antara teori dan pengujian. Seringkali, dari rumus (2.4) lebih mudah ditulis dengan membagi kedua sisi oleh area kontak A dan dengan mengganti K/H dengan K_w maka: (Archard, 1953)

$$h = K_w p s \quad (2.4)$$

Dimana :

h = kedalaman keausan yang terjadi.

K_w = faktor keausan (koefisien keausan).

p = tekanan kontak.

s = jarak sliding.

2.6.2 Model keausan Sarkar

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. Walaupun 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: (Sarkar, 1980)

$$\frac{V}{s} = k \frac{F_N}{H} \sqrt{1 + 3 \mu^2} \quad (2.5)$$

Dimana:

V = volume material yang hilang akibat keausan.

s = jarak sliding.

F_N = beban normal.

H = kekerasan dari material yang mengalami keausan.

k = koefisien aus tak berdimensi.

μ = koefisien geser.

2.6.3 Metode prediksi keausan Podra

Podra melakukan suatu perhitungan mengenai keausan dengan metode membandingkan antara simulasi menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan hasil eksperimental. FEM yaitu berguna sebagai menghitung hasil tekanan kontak. Perhitungan keausan menggunakan FEM dengan melibatkan penyelesaian masalah kontak umum antara benda yang saling kontak dengan menggunakan model dua dimensi (2D).

Proses perhitungan keausan akan melibatkan dua hal, yaitu mencari hasil tekanan kontak (p), lalu nilai tersebut digunakan kedalam persamaan (2.1) sebagai nilai dari tekanan kontak (p). Langkah simulasi FEM yaitu dengan menggambar

geometri dari model, menentukan sifat dari material, menentukan pembebanan, menentukan kondisi batas (*boundary condition*) dan masalah.

Selanjutnya setelah simulasi pertama, maka kemudian simulasi berikutnya dilakukan dengan memodelkan bentuk baru selanjutnya diberi gaya beban dan kondisi batas yang sesuai. Ketika memodelkan bentuk baru diusahakan agar sedemikian rupa sehingga dihasilkan model yang semirip mungkin dengan bentuk asli benda disaat terjadi deformasi akibat keausan.

Daerah yang memiliki gradien tegangan yang lebih tinggi dianjurkan menggunakan *mesh* yang lebih rapat. Karena semakin banyak jumlah elemen dalam model tersebut maka akan semakin akurat pula hasil yang diperoleh, Namun akan berpengaruh pada lamanya waktu perhitungan dan penggunaan komputer.

Setelah tegangan akibat kontak didapatkan, tahap lanjut yaitu menentukan status dari tiap elemen kontak (yang terjadi kontak maupun tidak). Koordinat nodal kontak dari setiap elemen yang terjadi kontak menunjukkan daerah lokasi kontak. Nodal *stress* dari titik didalam daerah kontak merupakan distribusi dari tekanan kontak.

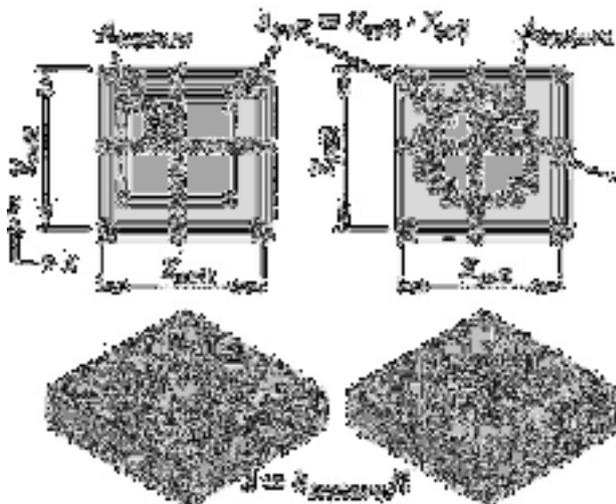
Metode Euler dipakai untuk dapat mengintegrasikan dari hukum keausan berhubungan dengan waktu. Pada tiap tahap simulasi keausan parameter dari sistem diasumsikan sebagai stabil serta mendukung ketinggian dari keausan pada tiap titik nodal berdasarkan pemodelan bentuk keausan.

2.7 Permukaan bertekstur (*surface texturing*)

2.7.1 Parameter permukaan bertekstur

Parameter tekstur yang berbeda, seperti bentuk, ukuran, densitas, kedalaman dan orientasi, atau kombinasi dari parameter ini, yang mengontrol efektivitas permukaan bertekstur permukaan pada performansi tribologikal. Geometri dan dimensi dari tekstur permukaan bervariasi dalam bentuk dan ukuran dari beberapa

mikron ke ratusan mikron. Tipe bentuk tekstur permukaan yang sering digunakan dalam 3D adalah persegi dan lingkaran yang ditunjukkan pada (Gambar 2.17).



Gambar 2.17 Bentuk tekstur permukaan 3D (*dimple*) (Gropper et al., 2016)

Desain geometri permukaan bertekstur yang paling umum digunakan adalah *dimple* berbentuk lingkaran karena fabrikasi mudah dan biaya rendah. (Gao, Meng, Liu, Fisher, & Jin, 2010) menunjukkan bahwa kemungkinan permukaan *dimple* memiliki efek menguntungkan pada berkurangnya rasio kontak kekasaran dan meningkatnya performansi lubrikasi pada *metal-on-metal hip joint replacement*, terutama pada kondisi *boundary lubrication*. Analisis numerik yang didesain (Gren, 2009) menunjukkan bahwa *laser surface texturing (LST) micro dimple* dapat membentuk lubrikasi hidrodinamik yang efektif mengurangi gaya gesekan, dan meningkatkan performansi lubrikasi.

2.7.2 Pengaruh permukaan bertekstur pada performansi tribologi

Berbagai aspek dari performansi tribologi yang hingga saat ini telah dikembangkan memiliki pengaruh dengan adanya teknologi permukaan bertekstur antara lain :

2.7.2.1 Gesekan

Permukaan bertekstur telah menjadi teknik umum untuk meningkatkan performansi tribologikal dari pasangan gesek di berbagai aspek bidang teknik, seperti tekstur tertancap pada disk komputer, segel mekanikal, silinder mobil dan bantalan. Penelitian yang signifikan dilakukan pada tekstur permukaan bertujuan untuk mengurangi gesekan, yang dalam perspektif keausan yaitu menguntungkan karena akan menyebabkan umur pakai suatu material lebih lama. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Hui Zhang et al (X. Zhang & Jia, 2015) menunjukkan bahwa tekstur permukaan petaloid efektif dalam mengurangi gesekan dan keausan *artificial hip joint* berbahan material CoCrMo.

Penelitian yang dilakukan oleh Ashwin Ramesh et al. (Ramesh et al., 2013) yaitu metode eksperimental dan metode numerik untuk karakteristik gesekan pada permukaan mikro tekstur dan menyimpulkan bahwa pengurangan gesekan terjadi sebesar 80% untuk permukaan bertekstur dibandingkan dengan permukaan tanpa tekstur melalui eksperimen. Kemudian, simulasi numerik menyatakan bahwa geometri tekstur pada aplikasi beban konstan akan menyebabkan gesekan yang rendah. Kemudian diikuti oleh Dipankar Choudhury et al. (Choudhury, Walker, Shirvani, & Mootanah, 2013) yang melakukan investigasi baik eksperimental maupun numerik teknik *honed surface* dalam *metal-on-metal hip joint* dan menunjukkan bahwa *honed surface* memiliki koefisien gesekan yang rendah pada kondisi berjalan normal, menaiki tangga, dan menuruni tangga. Selain itu, dengan berkurangnya gesekan juga dapat meningkatkan umur pakai implan.

Pengurangan gesekan secara signifikan telah diamati di sebagian besar literatur. Noel Brunetiere dan Bernald Tournerie (Brunetière & Tournerie, 2012) yang mempelajari efek dari kekasaran permukaan terhadap performansi permukaan bertekstur dan menyimpulkan bahwa permukaan bertekstur mengurangi ketergantungan performansi gesekan pada permukaan kasar dibandingkan permukaan halus. Kemudian, L. Galda et al (Galda, Sep, & Prucnal, 2016) menguji eksperimen untuk mengamati pengaruh geometri *dimple* di permukaan *sliding* atas sifat tribologikal dibawah kondisi tanpa pelumasan, dan menyimpulkan bahwa penurunan nilai koefisien gesek sekitar 60% dibandingkan dengan permukaan tanpa

dimple pada kisaran kecepatan geser 0,02-0,22 m/s. Mereka menyimpulkan bahwa penurunan nilai koefisien gesekan adalah faktor penting dimana *dimple* yang dangkal dan densitas dari lubrikan jadi kecil.

2.7.2.2 Keausan

Permukaan bantalan bertekstur menghasilkan tingkat keausan lebih rendah daripada permukaan tanpa tekstur dikarenakan area permukaan kontak berkurang, berkurangnya koefisien gesekan dan hilangnya *wear debris*, yang selanjutnya dapat mengurangi keausan permukaan. Permukaan bertekstur khususnya *micro cavities* (yang dikenal sebagai *dimple*) berfungsi sebagai perangkap untuk *wear debris* untuk meminimalkan keausan yang lebih abrasif baik kondisi lubrikasi maupun kondisi tanpa lubrikasi (Gropper, Wang, & Harvey, 2015) (Li, Yao, Hu, & Gu, 2014) (Ibatan, Uddin, & Chowdhury, 2015). *Wear debris* dari material yang bergesekan atau benda asing dapat terjebak dalam mikro-void dari permukaan tekstur, dengan demikian dapat mencegah terjadinya keausan lebih abrasif karena tubrukan. Penelitian eksperimental Taposh Roy et al (Roy, Choudhury, Ghosh, Mamat, & Pingguan-Murphy, 2014) tentang efek tribologikal dari tekstur permukaan *micro dimple* untuk aplikasi *ceramic-on-ceramic hip prostheses* dan menemukan bahwa sampel *dimple* dapat mengurangi koefisien gesekan sebesar 22% dan mengurangi laju keausan sebesar 53% dibandingkan dengan permukaan tanpa *dimple*. *Wear debris* juga ditemukan ukurannya lebih kecil untuk permukaan *dimple* daripada permukaan tanpa *dimple*. Lalu, Bo Zhang et al (B. Zhang, Huang, Wang, & Wang, 2013) menganalisis hubungan antara densitas tekstur, kedalaman rata-rata keausan dan koefisien gesekan pada baja bertekstur dan UHMWPE. Mereka menyimpulkan bahwa tekstur permukaan di permukaan UHMWPE efektif dapat mengurangi gesekan pada beban tinggi dibandingkan dengan baja. Tekstur permukaan pada UHMWPE secara signifikan mengurangi kedalaman rata-rata keausan dibandingkan dengan permukaan tekstur pada baja. Investigasi eksperimental yang dilakukan oleh Kangmei Li et al. (Li et al., 2014) dengan mengamati bahwa permukaan bertekstur bisa mengurangi baik keausan abrasif maupun adhesif dibandingkan dengan permukaan tanpa tekstur. Mereka

juga menganalisis pengaruh densitas tekstur pada performansi keausan. Mereka menemukan bahwa, permukaan dengan densitas tekstur 13% menunjukkan gesekan dan performansi keausan terbaik. Kemudian, Wei Tang et al. (Tang, Zhou, Zhu, & Yang, 2013) melakukan pengujian baik dalam teori maupun eksperimen untuk menganalisis pengaruh permukaan bertekstur untuk mengurangi gesekan dan keausan pada baja dalam kontak geser di bawah kondisi pelumasan. Mereka menyimpulkan bahwa daerah fraksi *dimple* 5% yang paling optimal sehingga dapat menghasilkan tekanan hidrodinamik yang terbesar dari semua daerah fraksi *dimple*. Selain itu, juga dapat mengurangi gesekan dan keausan hingga 38% dan 72% berturut-turut.

2.8 Teori dasar metode elemen hingga

Kemajuan dalam bidang komputer sangat begitu signifikan sehingga mempengaruhi dalam bidang penelitian ataupun industri, sehingga impian para ilmuwan dan profesional dalam mengembangkan ilmu pengetahuan serta industri menjadi kenyataan. Saat ini, analisa desain dan metode telah banyak memakai perhitungan matematis yang sulit dalam pemakaian harian. Metode elemen hingga (FEM) telah banyak memberikan bantuan dalam menghasilkan temuan baru dalam bidang riset dan industri, ini karena penggunaannya berperan sebagai *research tool* pada pengujian secara numerik.

Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) merupakan suatu metode analisa perhitungan berdasarkan dari gagasan dalam membangun suatu obyek yang sangat kompleks menjadi beberapa bagian yang lebih simple ataupun dengan membagi obyek yang sangat kompleks menjadi kecil serta kepingan-kepingan. Aplikasi gagasan ini dapat kita temukan dalam kehidupan sehari-hari yang sama penggunaannya dalam keteknikan, seperti permainan bongkar pasang, bangunan, perkiraan wilayah lingkaran dan lain sebagainya.

1. Konsep dasar analisis MEH
 - a. Menjadikan elemen-elemen diskrit untuk memperoleh simpangan-simpangan dan gaya-gaya anggota dari suatu struktur.
 - b. Menggunakan elemen-elemen kontinu untuk memperoleh solusi pendekatan terhadap permasalahan-permasalahan perpindahan panas, mekanika fluida atau mekanika padat.
2. Prosedur analisa struktur
 - a. Membagi struktur menjadi kepingan-kepingan (menjadi elemen).
 - b. Memberikan sifat-sifat fisik pada tiap elemen.
 - c. Hubungkan elemen-elemen pada tiap nodal untuk membentuk sebuah sistem perkiraan dari persamaan untuk struktur tersebut.
 - d. Menyelesaikan sistem persamaan tersebut yang disertai dengan jumlah yang tidak dikenal dititik simpul (contoh: perpindahan).
 - e. Hitung jumlah yang diinginkan (contoh: *strains* dan *stresses*).
3. Implementasi-implementasi pada computer
 - a. *Preprocessing* (membuat FE model, *loads* dan *constraints*).
 - b. *FEA solver* (merakit dan penyelesaian sistem persamaan).
 - c. *Postprocessing* (menampilkan hasil).
4. Jenis elemen-elemen pada metode elemen hingga
 - a. Elemen satu dimensi (garis)

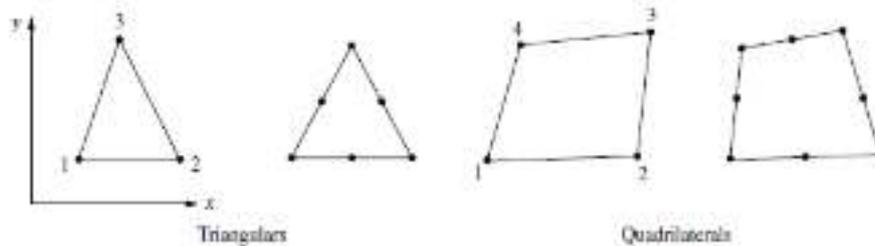
Elemen garis dua nodal (biasanya digunakan untuk mewakili bar) dan elemen baris pesanan yang lebih tinggi, seperti terlihat pada (Gambar 2.18).



Gambar 2.18 Elemen garis (Logan et al., 2007)

- b. Elemen dua dimensi (bidang)

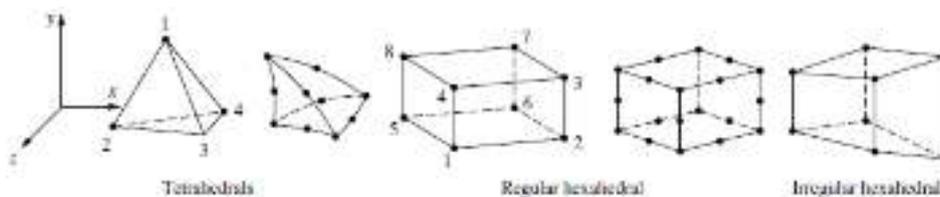
Elemen dua dimensi sederhana dengan nodal sudut (biasanya digunakan untuk merepresentasikan tegangan/regangan) dan elemen dua dimensi tingkat tinggi dengan simpul antara di sepanjang sisi, seperti pada (Gambar 2.19).



Gambar 2.19 Elemen bidang (Logan et al., 2007)

c. Elemen tiga dimensi (Volume)

Elemen tiga dimensi sederhana (biasanya digunakan untuk mewakili keadaan tegangan tiga dimensi) dan elemen tiga dimensi yang lebih tinggi dengan nodal *intermediate* sepanjang tepi, seperti pada (Gambar 2.20).

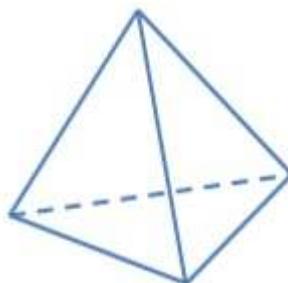


Gambar 2. 20 Elemen volume (Logan et al., 2007)

5. Macam-macam bentuk dan tipe *mesh*

a. Tetrahedral

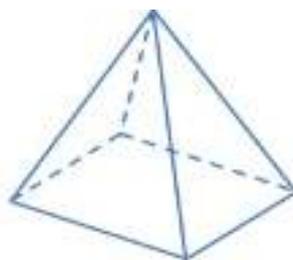
Tetrahedral memiliki 4 simpul, 6 sisi, dan dibatasi oleh 4 wajah segitiga. Dalam banyak kasus, *mesh* volume tetrahedral dapat dihasilkan secara otomatis.



Gambar 2. 21 Tetrahedral (George et al., 1991)

b. Piramida

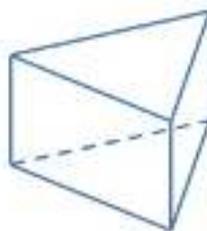
Piramida berbasis empat persegi memiliki 5 simpul, 8 sisi, dibatasi oleh 4 segitiga dan 1 wajah segiempat. Ini secara efektif digunakan sebagai elemen transisi antara elemen-elemen persegi dan segitiga yang dihadapi dan lainnya dalam jaring dan kisi-kisi gabungan.



Gambar 2.22 Piramida (George et al., 1991)

c. Triangular Prisma

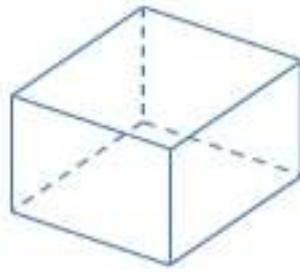
Sebuah prisma segitiga memiliki 6 simpul, 9 sisi, dibatasi oleh 2 segitiga dan 3 wajah segi empat. Keuntungan dengan jenis lapisan ini adalah bahwa dia memecahkan lapisan batas secara efisien.



Gambar 2.23 Triangular prisma (George et al., 1991)

d. Hexahedral

Heksahedral merupakan kubus topologi, memiliki 8 simpul, 12 sisi, dibatasi oleh 6 wajah segi empat. Itu juga disebut *hex* atau batu bata. Untuk jumlah sel yang sama, keakuratan solusi dalam jerat heksahedral adalah yang tertinggi.



Gambar 2. 24 Hexahedral (George et al., 1991)