

SKRIPSI
ANALISIS PENGARUH VARIASI *BOTTOM PROFILE DIMPLE* DI
PERMUKAAN *FEMORAL HEAD* TERHADAP KEAUSAN PADA
TOTAL HIP ARTHROPLASTY



MUHAMMAD IMAM AMMARULLAH

03051281520095

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJA

2019

SKRIPSI
ANALISIS PENGARUH VARIASI *BOTTOM PROFILE DIMPLE* DI
PERMUKAAN *FEMORAL HEAD* TERHADAP KEAUSAN PADA
TOTAL HIP ARTHROPLASTY

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana
Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya



OLEH
MUHAMMAD IMAM AMMARULLAH
03051281520095

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2019

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH VARIASI *BOTTOM PROFILE* *DIMPLE* DI PERMUKAAN *FEMORAL HEAD* TERHADAP KEAUSAN PADA *TOTAL HIP ARTHROPLASTY*

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat
Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik Mesin
Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Oleh:
MUHAMMAD IMAM AMMARULLAH
03051281520095

Palembang, 20 Juli 2019

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Irsyadi Yani, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197112251997021001

Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri
NIP. 195802011984031002

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**Agenda No. :
Diterima Tanggal :
Paraf :**

SKRIPSI

NAMA : MUHAMMAD IMAM AMMARULLAH
NIM : 03051281520095
JURUSAN : TEKNIK MESIN
BIDANG STUDI : KONSTRUKSI
**JUDUL : ANALISIS PENGARUH VARIASI
BOTTOM PROFILE DIMPLE DI
PERMUKAAN FEMORAL HEAD
TERHADAP KEAUSAN PADA TOTAL HIP
ARTHROPLASTY**
DIBUAT TANGGAL : 1 AGUSTUS 2018
SELESAI TANGGAL : 20 JULI 2019

Palembang, 20 Juli 2019

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D
NIP. 197112251997021001

Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri
NIP. 195802011984031002

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Skripsi ini dengan judul “ANALISIS PENGARUH VARIASI *BOTTOM PROFILE DIMPLE* DI PERMUKAAN *FEMORAL HEAD* TERHADAP KEAUSAN PADA *TOTAL HIP ARTHROPLASTY*” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Sriwijaya pada tanggal 20 Juli 2019

Palembang, 20 Juli 2019

Tim Penguji Karya tulis ilmiah berupa Skripsi

Ketua :

1. Dipl-Ing. Ir. Amrifan Saladin Mohruni, Ph.D. ()
NIP. 196409111999031002

Anggota :

2. Dr. Ir. Hendri Chandra, MT ()
NIP. 196004071990031003
3. Ir. H. Zainal Abidin, MT. ()
NIP. 195609101986021001

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Mesin

Irsyadi Yani, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197112251997021001

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

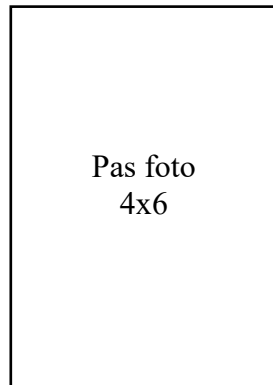
Nama : Muhammad Imam Ammarullah

NIM : 03051281520095

Judul : Analisis Pengaruh Variasi *Bottom Profile Dimple* di Permukaan
Femoral Head terhadap Keausan pada *Total Hip Arthroplasty*

Memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu) tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Pembimbing sebagai penulis korespondensi (*Corresponding author*).

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, 20 Juli 2019

Materai Rp. 6.000

Muhammad Imam Ammarullah
NIM. 03051281520095

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

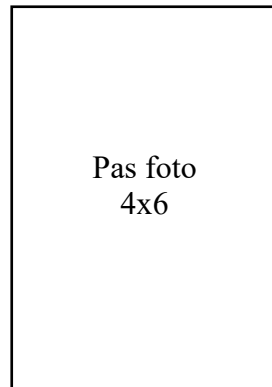
Nama : Muhammad Imam Ammarullah

NIM : 03051281520095

Judul : Analisis Pengaruh Variasi *Bottom Profile Dimple* di Permukaan
Femoral Head terhadap Keausan pada *Total Hip Arthroplasty*

Menyatakan bahwa Skripsi saya merupakan hasil karya sendiri didampingi Pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Palembang, 20 Juli 2019

Materai Rp. 6.000

Muhammad Imam Ammarullah
NIM. 03051281520095

RIWAYAT HIDUP

Muhammad Imam Ammarullah, Lahir di Palembang, 14 April 1999 yang merupakan anak kedua dari Bapak H. Ridwan Ansyori, SE., MM. dan Ibu Hj. Agustina Madani. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar di SD Pusri Palembang pada tahun 2007, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama dan lulus pada tahun 2013, lalu melanjutkan jenjang pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Plus Negeri 17 Palembang pada program CIBI – Akselerasi dan lulus pada tahun 2015. Di tahun yang sama, penulis melanjutkan jenjang pendidikan tinggi strata satu di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya. Selain menjadi salah satu yang terbaik dari segi akademik, penulis memiliki latar belakang kepemimpinan yang luar biasa, dimana tercatat dalam berbagai posisi strategis di berbagai organisasi, beliau menjadi Kepala Divisi Sosial dan Agama SAPMA-PP Palembang 2015-2016, Kepala Departemen Syi'ar Wilayah Palembang LDF Kalam FT Unsri dan Wakil Ketua Umum Sriwijaya Membaca regional Palembang 2016-2017, Ketua Umum Ikatan Pemuda Peduli Sosial dan Koordinator Relawan Inisiatif Zakat Indonesia perwakilan Sumatera Selatan 2017-2018, Sekertaris Jendral Komunitas Muda Nuklir Nasional dan Ketua Dewan Penasehat Ikatan Pemuda Peduli Sosial tahun 2018-2019, dan saat ini aktif sebagai Peneliti Muda di Tim Riset Kolaborasi Teknik Biomedis Universitas Sriwijaya - Universiti Teknologi Malaysia. Penulis juga memiki sederet capaian prestasi, diantaranya Pemakalah *Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty* tingkat Internasional 2018, Juara 1 dan Makalah Terbaik Esai “NEC Prima Unram” tingkat Nasional 2018, Juara 1 dan Makalah Terbaik Esai “*Science Week*” tingkat Nasional 2018, Mahasiswa Berprestasi Utama II Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya 2018, serta berbagai prestasi Nasional dan Internasional lainnya. Melalui kapasitas dan pengalaman yang dimiliki, penulis sering diundang menjadi pembicara/pemateri terkait kepemimpinan, manajemen organisasi, dan kepenulisan ilmiah pada berbagai kegiatan/pelatihan/seminar hingga skala Nasional.

***Aku dedikasikan secara khusus teruntuk kedua orang tuaku tercinta,
H. Ridwan Ansyori, SE., MM. dan Hj. Agustina Madani.***

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur kehadirat Allah *Subhanahu Wa Ta'ala* karena atas berkat limpahan rahmat, anugerah, dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan karya tulis ilmiah Skripsi yang mana merupakan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya dengan judul “ANALISIS PENGARUH VARIASI *BOTTOM PROFILE DIMPLE* DI PERMUKAAN *FEMORAL HEAD* TERHADAP KEAUSAN PADA *TOTAL HIP ARTHROPLASTY*”.

Tak lupa dalam kesempatan yang berbahagia ini penulis ingin menyampaikan begitu banyak terimakasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan selama proses pengerjaan Skripsi ini, adapun pihak-tersebut adalah:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri selaku Dosen Pembimbing Skripsi sekaligus Ketua Tim Riset Kolaborasi Teknik Biomedis Universitas Sriwijaya - Universiti Teknologi Malaysia yang bersedia meluangkan waktu, tenaga, serta pikiran mulai dari awal hingga akhir penyelesaian pengerjaan Skripsi.
2. Bapak Assoc. Prof. Dr. Ardiyansyah Syahrom, ST., M.Eng. selaku Direktur Utama *Sport and Innovation Technology Centre*, Universiti Teknologi Malaysia sekaligus salah satu bagian inti dari Tim Riset Kolaborasi Teknik Biomedis Universitas Sriwijaya - Universiti Teknologi Malaysia yang memberikan peluang dalam menjalankan kolaborasi riset berskala internasional dengan pemberian izin penelitian, masukan dan arahan, serta fasilitas penelitian selama di Malaysia.
3. Bapak Dr. Amir Putra Bin Md Saad, B.Eng., M.Eng. yang merupakan anggota asosiasi *Sport and Innovation Technology Centre*, Universiti Teknologi Malaysia sekaligus salah satu bagian inti dari Tim Riset Kolaborasi Teknik Biomedis Universitas Sriwijaya - Universiti Teknologi

Malaysia yang menjadi pembimbing saya dalam melakukan penelitian selama di Malaysia.

4. Bapak Irsyadi Yani, ST., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Jurusan dan Bapak Amir Arifin, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya yang memberikan bimbingan serta arahan dalam ruang lingkup Jurusan Teknik Mesin.
5. Bapak Dipl.-ing. Ir. Amrifan Saladin Mohruni, Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang secara rutin memberikan bimbingan akademik kepada penulis ataupun nasehat-nasehat berharganya baik dalam ataupun luar waktu kuliah.
6. Akbar Teguh Prakoso, ST., Tri Satya Ramadhoni, ST., dan Dhika Wicaksono, ST. selaku teman dan rekan sesama peneliti yang telah membantu saya dalam menjalankan penelitian, membuat Skripsi, hingga kebersamai saya di berbagai kondisi suka dan duka.
7. Kak Daus dan Kak Jerry selaku staf administrasi di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya yang telah banyak membantu dalam proses administrasi dan pengurusan berkas selama perkuliahan.
8. Teman-teman peneliti di *Sport and Innovation Technology Centre, Medical Implant and Technology*, dan Tim Riset Kolaborasi Teknik Biomedis Universitas Sriwijaya - Universiti Teknologi Malaysia yang memberikan dedikasinya dalam membantu penulis terkait Pemahaman di bidang Teknik Biomedis terkhusus pada Ilmu Biomekanika.
9. Seluruh Dosen Pengajar di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya yang telah mengajarkan ilmu-ilmu yang bermanfaat selama proses perkuliahan.
10. Seluruh keluarga besar mahasiswa Teknik Mesin Universitas Sriwijaya terutama teman-teman seperjuangan angkatan 2015 kampus Palembang.
11. Sahabat seperjuangan di berbagai organisasi/komunitas yang pernah kebersamai langkah saya, diantaranya Ikatan Pemuda Peduli Sosial, Komunitas Muda Nuklir Nasional, Inisiatif Zakat Indonesia perwakilan Sumatera Selatan, Ikatan Duta Bahasa Sumatera Selatan, Sriwijaya Membaca regional Palembang, IYOIN LC regional Palembang, Global

Peace Youth Indonesia regional Palembang, SAPMA-PP Palembang, Inspiring Summit Team, BEM KM Unsri, UKM LDK Nadwah Unsri, UKM U-Read Unsri, AIESEC in Unsri, LDF Kalam FT Unsri, BO KST KM FT Unsri, Himpunan Mahasiswa Mesin, dan lainnya.

Penulis sangat menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan Skripsi ini, oleh karena itu kritik dan saran serta masukan yang bersifat membangun sangat penulis harapkan untuk keterbaikan kedepannya.

Wassalamualaikum Warahmatullah Wabarakatuh

Palembang, 20 Juli 2019

Penulis

RINGKASAN

ANALISIS PENGARUH VARIASI *BOTTOM PROFILE DIMPLE* DI PERMUKAAN *FEMORAL HEAD* TERHADAP KEAUSAN PADA *TOTAL HIP ARTHROPLASTY*

Karya tulis ilmiah berupa Skripsi, 20 Juli 2019

Muhammad Imam Ammarullah; Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri

Analysis of the Influence of Bottom Profile Dimple Variations in Femoral Head Surface against Wear in Total Hip Arthroplasty

xxix + 170 halaman, 21 tabel, 81 gambar, 7 lampiran

RINGKASAN

Metal-on-metal telah dipilih sebagai bantalan pasang *total hip arthroplasty* dikarenakan sejumlah keunggulan yang dimilikinya bila dibandingkan dengan kombinasi material lainnya. Namun, permasalahan utama pada bantalan pasang tersebut saat berkontak menghasilkan partikel aus berupa ion logam berukuran nano yang berbahaya bagi sistem biologis tubuh, yang akan menyebabkan keracunan. Meminimalisir keausan sangat penting untuk menghindari resiko keracunan. Aplikasi permukaan bertekstur telah diterapkan pada *total hip arthroplasty* dengan penambahan *dimple* di permukaan bantalan pasang yang berkontak untuk mengurangi kontak permukaan langsung dan terbukti dapat mengurangi keausan. Diketahui tekanan kontak sangat penting untuk keausan dan karenanya mempengaruhi secara signifikan umur penggunaan *implan*, dimana mengurangi tekanan kontak terutama pada daerah yang mendapat *gait loading* tinggi merupakan langkah strategis untuk mengurangi keausan. Kegagalan *total hip arthroplasty* akibat keausan dan ion logam bantalan pasang *metal-on-metal* masih banyak dilaporkan hingga saat ini menjadikan tantangan tersendiri untuk memaksimalkan efek positif penambahan *dimple* yang perlu dikaji secara komprehensif. Berbagai parameter yang tersedia telah diinvestigasi untuk mendapatkan parameter yang optimum. Sebagai parameter yang terbilang baru, *bottom profile dimple* masih memiliki ruang penelitian yang belum tereksplorasi. Sebagai keterbaruan penelitian yang membutuhkan pemahaman secara mendalam, penelitian pada tugas akhir ini akan mengkaji lebih lanjut pengaruh variasi *bottom profile dimple* terhadap keausan pada *total hip arthroplasty*. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisa pengaruh variasi *bottom profile dimple* terhadap tekanan kontak dan keausan.

Penelitian terkait aplikasi permukaan bertekstur mendapatkan momentum baru pada tahun 1996, dan berdasarkan hasil yang dijabarkan terlihat potensi besar didalamnya untuk penerapan pada berbagai bidang. Empat tahun kemudian, penerapan permukaan bertekstur untuk *total hip arthroplasty* diinisiasi untuk mengurangi gesekan dan keausan yang terjadi pada bantalan pasang *metal-on-*

polyethylene secara eksperimental menggunakan *hip joint simulator* yang mana menunjukkan peningkatan kualitas *implan* luar biasa dengan penambahan *dimple* pada permukaan bantalan pasang berkontak. Dengan basis penelitian tersebut, tren riset untuk tahun-tahun berikutnya menunjukkan berbagai upaya penelitian terkait parameter penambahan *dimple* untuk mengeksplorasi lebih jauh ruang penelitian ini. Berbagai parameter penambahan *dimple* seperti bentuk, diameter, kedalaman, jarak, arah, pola, hingga *bottom profile* yang baru-baru ini dipresentasikan pada tahun 2018 dikaji secara komprehensif untuk memberikan pemahaman menyeluruh serta mencari parameter penambahan *dimple* yang optimum. Seiring kemajuan teknologi perangkat lunak dan peningkatan performa komputasi, analisa numerik menggunakan metode elemen hingga mendapatkan posisi strategis pada penelitian parametrik terkhusus berbagai penelitian parameter penambahan *dimple* pada *total hip arthroplasty* dengan efisiensi waktu, biaya, dan tenaga yang ditawarkan namun tetap memberikan hasil yang menjanjikan.

Parameter *bottom profile* yang ditelusuri menggunakan variasi *flat*, *ball*, dan *drill*. Untuk mendapatkan hasil secara akurat serta mewakili kondisi pemuatan fisiologis seutuhnya, analisa numerik menggunakan metode elemen hingga dengan program komersial ABAQUS/CAE 16.4-1 dilakukan dengan pemodelan geometri *ball-in-socket* serta pemberian *gait loading* dan rentang gerak 3D berjumlah 32 fase/siklus dengan jumlah 2.000.000 siklus yang ekuivalen dengan 2 tahun pemakaian *implan*. Konvergensi elemen dilakukan untuk mencari jumlah elemen yang merepresentasikan model elemen hingga, serta pembaharuan geometri (*adaptive remeshing*), diterapkan untuk mempresentasikan hasil dalam waktu sebenarnya, serta validasi tekanan kontak dilakukan dengan penelitian sebelumnya untuk hasil yang rasional. Dalam analisa keausan, model keausan dilakukan secara kontak kering dan mengadopsi persamaan keausan Archard untuk kondisi aktual pada setiap fase dengan sejumlah nodal.

Melalui hasil analisa komputasi, didapatkan bahwa model *total hip arthroplasty* dengan *drill bottom profile dimple* mempunyai tekanan kontak yang paling rendah untuk satu siklus penuh bila dibandingkan dengan model *total hip arthroplasty* lainnya. Ditemukan bahwa tekanan kontak paling tinggi berada di fase ke-7 dan paling rendah di fase ke-30, yang selaras dengan besar pembebanan tertinggi dari sambungan tulang pinggul berada pada fase tersebut. Hasil dari evaluasi keausan juga menunjukkan hal serupa dengan tekanan kontak, dimana model *total hip arthroplasty* dengan *drill bottom profile dimple* menghasilkan keausan linear dan volumetrik yang paling rendah dari model *total hip arthroplasty* lainnya. Didapatkan bahwa dengan penambahan *drill bottom profile* pada model *total hip arthroplasty* dapat mengurangi keausan lebih baik dibandingkan dengan model lainnya.

Kata Kunci : *Total hip arthroplasty*, Keausan, *Dimple*, *Bottom profile*
Kepustakaan : 216 (1953-2019)

SUMMARY

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF BOTTOM PROFILE DIMPLE VARIATIONS IN FEMORAL HEAD SURFACE AGAINST WEAR IN TOTAL HIP ARTHROPLASTY

Scientific Paper in the form of Thesis, July 20th 2019

Muhammad Imam Ammarullah; supervised by Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri

Analisis Pengaruh Variasi Profile Dimple Bottom di Permukaan Femoral Head Terhadap Keausan pada Total Hip Arthroplasty

xxix + 170 pages, 21 table, 81 picture, 7 attachment

SUMMARY

Metal-on-metal has chosen as a couple bearing for total hip arthroplasty due to several advantages it has when compared to other material combinations. However, the main problem with these couple bearings when in contact produce wear particles in the form of nano-sized metal ions which are harmful to the body's biological system, which will cause poisoning. Minimizing wear is very important to avoid the risk of poisoning. Textured surface applications have applied to the total hip arthroplasty with the addition of dimple on the surface of the couple bearing which are in contact to reduce direct surface contact and are proven to reduce wear. It is known that contact pressure is significant for wear and hence significantly affects the age of implant use, where reducing contact pressure especially in areas that have high gait loading is a strategic step to reduce wear. The failure of total hip arthroplasty due to wear and metal ions metal-on-metal couple bearing is still widely reported to date making it a challenge to maximize the positive effects of dimple additions that need to be studied comprehensively. Various available parameters have been investigated to obtain the optimum parameters. As a fairly new parameter, bottom profile dimple still has unexplored research space. As a renewal of research that requires deep understanding, the research in this final project will further examine the effect of bottom profile dimple variation against wear on the total hip arthroplasty. The purpose of this study is to analyze the effect of bottom profile dimple variations on contact pressure and wear.

Research related to textured surface applications gained new momentum in 1996, and based on the results outlined, it shows great potential in them for application in various fields. Four years later, the application of textured surfaces to total hip arthroplasty was initiated to reduce friction and wear that occurred in metal-on-polyethylene couple bearing experimentally using a hip joint simulator which showed an increase in the quality of extraordinary implants with the dimple addition on the couple bearing surface in contact. Based on this research, the trend of research for the following years shows a variety of research efforts

related to the parameters of the additional dimple to explore further this research space. Various parameters of dimple additions such as shape, diameter, depth, distance, direction, pattern, and bottom profile which present in 2018 are reviewed comprehensively to provide a comprehensive understanding and to find the optimum dimple addition parameters. As software technology advances and computational performance improves, the numerical analysis uses the finite element method achieve a strategic position in parametric research, especially various studies of dimple addition parameters in total hip arthroplasty with the efficiency of time, cost, and energy offered but still provide promising results. The bottom profile parameters that are traced use ball, flat, and drill variations. To get the results accurately and represent the full physiological loading conditions, numerical analysis using the finite element method with the ABAQUS / CAE 16.4-1 commercial program was carried out with ball-in-socket geometry modelling and 32 phase gait loading and 3D motion ranges. Convergence is done to find the number of elements that represent finite element models, as well as geometrical renewal (adaptive remeshing), applied to present results in real time, and validation of contact pressure carried out with previous research for rational results. In wear analysis, the wear model is carried out in dry contact and adopts the Archard wear equation for actual conditions in each phase with several nodals.

Through the results of computational analysis, it was found that the total hip arthroplasty model with dimple drill bottom profile had the lowest contact pressure for one full cycle when compared with other models of total hip arthroplasty. It was found that the highest contact pressure was in the 7th and lowest phase in the 30th phase, which corresponded to the highest loading height of the hip joint at that phase. The results of the wear evaluation also show a similarity to contact pressure, where the total hip arthroplasty model with drill bottom profile dimple results in the lowest linear and volumetric wear of the other total hip arthroplasty models. It was found that the addition of a drill bottom profile dimple on the total hip arthroplasty model can reduce wear better than other models.

Keywords : Total Hip Arthroplasty, Wear, Dimple, Bottom Profile
Citations : 216 (1953-2019)

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
Halaman Pengesahan.....	ii
Halaman Pengesahan Agenda	iii
Halaman Persetujuan	iv
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi	v
Halaman Pernyataan Integritas.....	vi
Riwayat Hidup.....	vii
Halaman Persembahan	viii
Kata Pengantar	ix
Ringkasan	xii
Summary	xiv
Daftar Isi.....	xvi
Daftar Gambar.....	xx
Daftar Tabel.....	xxiii
Daftar Lampiran	xxv
Daftar Istilah.....	xxvi
Daftar Lambang.....	xxviii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	8
1.3 Batasan Masalah.....	9
1.4 Tujuan Penelitian.....	10
1.5 Manfaat Penelitian.....	10
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 Sambungan Tulang Pinggul	11
2.2 Biomekanika Sambungan Tulang Pinggul.....	12
2.2.1 Jenis-Jenis Gerakan.....	12
2.2.2 Siklus Berjalan Normal.....	14
2.2.3 Gaya yang Berkerja.....	14

2.2.4	Rentang Gerak.....	17
2.3	Penyakit Pada Sambungan Tulang Pinggul	19
2.3.1	<i>Osteoarthritis</i>	19
2.3.2	<i>Avascular Necrosis</i>	20
2.3.3	Fraktur Leher <i>Femur</i>	21
2.4	Sambungan Tulang Pinggul Buatan (<i>Artificial Hip Joint</i>).....	22
2.4.1	<i>Hip Resurfacing</i>	22
2.4.2	<i>Total Hip Arthroplasty</i>	23
2.5	Komponen <i>Total Hip Arthroplasty</i>	24
2.5.1	<i>Femoral Stem</i>	25
2.5.2	<i>Femoral Head</i>	25
2.5.3	<i>Acetabular Cup</i>	26
2.5.4	<i>Acetabular Shell</i>	26
2.6	Prosedur Operasi <i>Total Hip Arthroplasty</i>	26
2.7	Jenis-Jenis Bantalan Pasang pada <i>Total Hip Arthroplasty</i>	27
2.7.1	<i>Ceramic-on-Ceramic (CoC)</i>	30
2.7.2	<i>Ceramic-on-Plastic (CoP)</i>	31
2.7.3	<i>Metal-on-Metal (MoM)</i>	32
2.7.4	<i>Metal-on-Plastic (MoP)</i>	33
2.8	Biotribologi pada <i>Total Hip Arthroplasty</i>	34
2.8.1	Mekanika Kontak	35
2.8.2	Gesekan	38
2.8.3	Keausan	41
2.8.3.1	Keausan Abrasif	45
2.8.3.2	Keausan Adhesif	46
2.8.3.3	Keausan Lelah	47
2.8.3.4	Keausan Korosif.....	48
2.8.3.5	Keausan Erosif	49
2.8.4	Pelumasan.....	49
2.8.4.1	Pelumasan Batas.....	52
2.8.4.2	Pelumasan Campuran	53
2.8.4.3	Pelumasan Film Penuh	54
2.9	Analisa Elemen Hingga pada <i>Total Hip Arthroplasty</i>	54

2.9.1	Pendahuluan Metode Elemen Hingga pada Biomekanika <i>Ortopedi</i>	55
2.9.2	Pemodelan Elemen Hingga <i>Total Hip Arthroplasty</i>	59
2.9.3	Pembebanan <i>Total Hip Arthroplasty</i> dalam Analisa Elemen Hingga	60
2.9.4	Evalusai Tekanan Kontak dengan Metode Elemen Hingga.....	63
2.10	Aplikasi Permukaan Bertekstur Pada <i>Total Hip Arthroplasty</i>	64
2.11	Parameter Penambahan <i>Dimple</i>	65
2.11.1	Parameter Bentuk <i>Dimple</i>	66
2.11.2	Parameter Diameter <i>Dimple</i>	67
2.11.3	Parameter Kedalaman <i>Dimple</i>	68
2.11.4	Parameter Jarak <i>Dimple</i>	68
2.11.5	Parameter Arah <i>Dimple</i>	69
2.11.6	Parameter Susunan <i>Dimple</i>	70
2.11.7	Parameter <i>Bottom Profile Dimple</i>	70
2.12	Reverensi Penelitian.....	72
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		90
3.1	Diagram Alir Penelitian	90
3.2	Pengumpulan Data	91
3.2.1	Dimensi Pemodelan	91
3.2.2	Parameter <i>Dimple</i>	91
3.2.3	Properti Material	92
3.2.4	Koefisien Keausan	92
3.2.5	Koefisien Gesekan	93
3.2.6	<i>Gait Loading</i> dan Rentang Gerak.....	93
3.3	Pemodelan Geometri	95
3.4	<i>Meshing</i>	96
3.5	Analisa Elemen Hingga dari Model Kontak	99
3.6	Prosedur Simulasi.....	100
3.6.1	<i>Import</i> Model Elemen Hingga.....	100
3.6.2	Penentuan Material.....	101
3.6.3	<i>Assembly</i> Model Elemen Hingga	102
3.6.4	Konfigurasi <i>Step</i>	103
3.6.5	Penentuan Interaksi Permukaan	104

3.6.6	Penentuan Kondisi Batas	107
3.6.7	Pemberian Beban	109
3.6.8	Menjalankan Simulasi	111
3.6.9	Visualisasi Hasil	112
3.6.10	Studi Konvergensi Elemen	113
3.7	Validasi Hasil	114
3.8	Analisa Kontak	116
3.9	Jarak Geser	117
3.10	Evaluasi Keausan.....	119
3.10.1	Keausan Linear	119
3.10.2	Keausan Volumetrik.....	120
3.11	Pembaharuan Geometri	121
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		124
4.1	Studi Konvergensi Elemen	124
4.2	Validasi Tekanan Kontak	126
4.3	Analisa Tekanan Kontak	128
4.4	Studi Konvergensi Keausan.....	130
4.5	Analisa Jarak Geser	133
4.6	Validasi Keausan	134
4.7	Analisa Keausan	136
4.7.1	Keausan Linear	137
4.7.2	Keausan Volumetrik.....	139
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		142
5.1	Kesimpulan.....	142
5.2	Saran	143
DAFTAR RUJUKAN		144
LAMPIRAN		162

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Anatomi sambungan tulang pinggul 12
Gambar 2.2	Gerakan sambungan tulang pinggul 13
Gambar 2.3	Siklus berjalan normal 14
Gambar 2.4	Gaya yang berkerja pada sambungan tulang pinggul 15
Gambar 2.5	<i>Gait loading</i> sambungan tulang pinggul dalam kondisi berjalan normal berdasarkan ISO 14242-1 16
Gambar 2.6	Rentang gerakan maksimal sambungan tulang pinggul untuk berbagai gerakan 18
Gambar 2.7	Rentang gerak sambungan tulang pinggul dalam kondisi berjalan normal berdasarkan ISO 14242-1 18
Gambar 2.8	<i>Osteoarthritis</i> 20
Gambar 2.9	<i>Avascular necrosis</i> 21
Gambar 2.10	Fraktur leher <i>femur</i> 22
Gambar 2.11	<i>Hip resurfacing</i> 23
Gambar 2.12	<i>Total hip arthroplasty</i> 24
Gambar 2.13	Komponen <i>total hip arthroplasty</i> 25
Gambar 2.14	Prosedur operasi <i>total hip arthroplasty</i> 27
Gambar 2.15	Laju keausan polietilen terhadap berbagai jenis material 29
Gambar 2.16	Bantalan pasang CoC 31
Gambar 2.17	Bantalan pasang CoP 32
Gambar 2.18	Bantalan pasang MoM 33
Gambar 2.19	Bantalan pasang MoP 34
Gambar 2.20	Konfigurasi pemodelan mekanika kontak pada <i>total hip arthroplasty</i> 36
Gambar 2.21	Kontak antara dua benda elastis dengan permukaan melengkung 37
Gambar 2.22	Tahap-tahap keausan 45
Gambar 2.23	Proses keausan abrasif pada <i>total hip arthroplasty</i> 46

Gambar 2.24	Proses keausan abrasif akibat benda ketiga pada <i>total hip arthroplasty</i>	46
Gambar 2.25	Proses keausan adhesif pada <i>total hip arthroplasty</i>	47
Gambar 2.26	Proses keausan lelah pada <i>total hip arthroplasty</i>	48
Gambar 2.27	Proses keausan korosif pada <i>total hip arthroplasty</i>	48
Gambar 2.28	Proses keausan erosif pada <i>total hip arthroplasty</i>	49
Gambar 2.29	Kurva stribeck.....	50
Gambar 2.30	Pelumasan batas pada <i>total hip arthroplasty</i>	53
Gambar 2.31	Pelumasan campuran pada <i>total hip arthroplasty</i>	53
Gambar 2.32	Pelumasan film penuh pada <i>total hip arthroplasty</i>	54
Gambar 2.33	Komunikasi dan skema pengetahuan Biomekanika <i>ortopedi</i> antara dokter dan insinyur.....	56
Gambar 2.34	Pendekatan untuk menganalisis Biomekanika ortopedi <i>total hip arthroplasty</i> menggunakan metode elemen hingga.....	58
Gambar 2.35	Kurva beban vertikan <i>total hip arthroplasty</i> dalam kondisi berjalan normal berdasarkan ISO 14242.....	61
Gambar 2.36	Kurva beban beban 3D <i>total hip arthroplasty</i> dalam kondisi berjalan normal.....	62
Gambar 2.37	Skematika pembebanan pada <i>total hip arthroplasty</i> dengan pembebanan 3D dan Pembebanan vertikal.....	62
Gambar 2.38	Perbedaan variasi ketebalan film pelumas <i>total hip arthroplasty</i> dengan pembebanan vertikal dan 3D dalam kondisi berjalan normal.....	63
Gambar 2.39	<i>Dimple</i> dan <i>protrusion</i>	65
Gambar 2.40	Parameter bentuk <i>dimple</i>	66
Gambar 2.41	Parameter diameter <i>dimple</i>	67
Gambar 2.42	Parameter kedalaman <i>dimple</i>	68
Gambar 2.43	Parameter jarak <i>dimple</i>	68
Gambar 2.44	Parameter arah <i>dimple</i>	69
Gambar 2.45	Parameter susunan <i>dimple</i>	70
Gambar 2.46	Parameter <i>bottom profile dimple</i>	70
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	90
Gambar 3.2	<i>Giat loading</i>	94
Gambar 3.3	Rentang gerak.....	94
Gambar 3.4	Pemodelan komponen <i>femoral head</i> dan <i>acetabular cup</i>	95
Gambar 3.5	Pemodelan geometri dengan penambahan <i>dimple</i>	96

Gambar 3.6	<i>Meshing</i> geometri	97
Gambar 3.7	Model elemen hingga <i>total hip arthroplasty</i>	97
Gambar 3.8	<i>Meshing</i> pada daerah penambahan <i>dimple</i>	98
Gambar 3.9	Analisa elemen hingga dari model kontak.....	100
Gambar 3.10	<i>Import</i> model elemen hingga	101
Gambar 3.11	Penentuan material.....	102
Gambar 3.12	<i>Assembly</i> model elemen hingga.....	103
Gambar 3.13	Konfigurasi <i>step</i>	104
Gambar 3.14	Penentuan interaksi permukaan	106
Gambar 3.15	Penentuan koefisien gesek dalam interaksi permukaan.....	107
Gambar 3.16	Penentuan kondisi batas pada <i>acetabular cup</i>	108
Gambar 3.17	Penentuan kondisi batas pada <i>femoral head</i>	109
Gambar 3.18	Data resultan gaya yang dimasukkan dalam simulasi	110
Gambar 3.19	Pemberian beban.....	111
Gambar 3.20	Menjalankan simulasi	112
Gambar 3.21	Visualisasi hasil	113
Gambar 3.22	Validasi hasil dari peneltan sebelumnya.....	115
Gambar 3.23	Karakteristik geometris dari <i>total hip arthroplasty</i>	116
Gambar 3.24	Skematik jarak geser menggunakan gerakan <i>fleksi/ekstensi</i> ...	118
Gambar 3.25	Ilustrasi <i>adaptive remeshing</i> pada <i>acetabular cup</i>	123
Gambar 4.1	Hasil studi konvergensi tanpa penambahan <i>dimple</i>	124
Gambar 4.2	Hasil studi konvergensi dengan penambahan <i>dimple</i>	125
Gambar 4.3	Validasi tekanan kontak.....	127
Gambar 4.4	Perbandingan tekanan kontak semua model <i>total hip arthroplasty</i> dengan dan tanpa penambahan <i>dimple</i>	128
Gambar 4.5	Studi konvergensi keausan linear	131
Gambar 4.6	Studi konvergensi keausan volumetrik.....	132
Gambar 4.7	Jarak geser secara triaksial untuk satu siklus berjalan normal	134
Gambar 4.8	Validasi keausan linear	135
Gambar 4.9	Validasi keausan volumetrik.....	135
Gambar 4.10	Keausan linear kumulatif untuk model <i>total hip arthroplasty</i> tanpa dan dengan penambahan <i>dimple</i>	137
Gambar 4.11	Keausan volumetrik kumulatif untuk model <i>total hip arthroplasty</i> tanpa dan dengan penambahan <i>dimple</i>	139

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Berbagai pengukuran gaya pada sambungan tulang pinggul	16
Tabel 2.2 Rata-rata rentang gerak sambungan tulang pinggul dalam kondisi berjalan normal	19
Tabel 2.3 Perbandingan kelebihan dan kekurangan bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i> yang berbeda	28
Tabel 2.4 Laju keausan linear dan volumetrik dari berbagai bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i>	28
Tabel 2.5 Sifat mekanis berbagai material bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i>	29
Tabel 2.6 Partikel aus dan repon biologis pada berbagai bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i>	29
Tabel 2.7 Koefisien gesek berbagai material bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i> dalam kondisi tanpa pelumasan	39
Tabel 2.8 Koefisien gesek <i>total hip arthroplasty</i> pada berbagai jenis rezim pelumasan	40
Tabel 2.9 Faktor gesekan dari berbagai jenis bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i> dalam kondisi dengan pelumas	40
Tabel 2.10 Faktor gesekan untuk berbagai rezim pelumasan <i>total hip arthroplasty</i>	41
Tabel 2.11 Faktor keausan berbagai bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i> melalui metode <i>pin-on-plate</i>	44
Tabel 2.12 Nilai kekasaran permukaan untuk berbagai bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i>	51
Tabel 2.13 Rasio lamda dan rezim pelumasan	52
Tabel 2.14 Rezim pelumasan untuk berbagai bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i>	52
Tabel 2.15 Berbagai perangkat lunak yang digunakan untuk membuat model elemen hingga untuk kasus Biomekanika <i>ortopedi</i>	58
Tabel 2.16 Prediksi tekanan kontak maksimum untuk berbagai jenis bantalan pasang <i>total hip arthroplasty</i>	64
Tabel 2.17 Matriks Reverensi Penelitian	72

Tabel 3.1	Dimensi pemodelan <i>total hip arthroplasty</i>	91
Tabel 3.2	Parameter <i>dimple</i>	92
Tabel 3.3	Properti material CoCrMo	92
Tabel 3.4	Nilai koefisien keausan CoCrMo	93

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1	Gambar Detail <i>Acetabular Cup</i> dan <i>Femoral Head</i> 162
Lampiran 2	Gambar Detail <i>Femoral Head</i> dengan <i>Flat Bottom Profile Dimple</i> 163
Lampiran 3	Gambar Detail <i>Femoral Head</i> dengan <i>Ball Bottom Profile Dimple</i> 164
Lampiran 4	Gambar Detail <i>Femoral Head</i> dengan <i>Drill Bottom Profile Dimple</i> 165
Lampiran 5	Data <i>Gait Loading</i> dan Rentang Gerak 166
Lampiran 6	Data Resultan Gaya 168
Lampiran 7	Matrikulasi <i>Research Gap</i> 169

DAFTAR ISTILAH

Istilah	Penjelasan
Sambungan tulang pinggul	Sendi yang menghubungkan antara <i>femur</i> dan <i>pelvis</i>
<i>Femur</i>	Tulang paha
<i>Pelvis</i>	Tulang pinggul
Artikulasi	Pergerakan sendi yang saling berkontak
<i>Kartilago</i>	Tulang rawan yang melapisi permukaan tulang keras yang saling berkontak
Otot	Jaringan dalam tubuh manusia berupa alat gerak aktif yang mampu menggerakkan tulang
<i>Acetabulum</i>	Permukaan cembung tulang pinggul dimana merupakan tempat kepala <i>femur</i> berartikulasi
Cairan <i>synovial</i>	Cairan dalam tubuh manusia yang berfungsi untuk melumasi permukaan tulang yang saling berkontak
<i>Osteoarthritis</i>	Penyakit pada sambungan tulang pinggul dengan degenerasi <i>kartilago</i> pada kepala <i>femur</i> dan <i>acetabulum</i>
<i>Avascular Necrosis</i>	Penyakit pada sambungan tulang pinggul yang diakibatkan dari hilangnya suplai darah ke tulang pinggul
<i>Implan</i>	Peralatan medis yang digunakan untuk menggantikan struktur dan mengembalikan fungsi suatu bagian biologis yang rusak
<i>Artificial hip joint</i>	<i>Implan</i> pengganti sambungan tulang pinggul yang rusak
<i>Hip resurfacing</i>	Operasi penggantian sambungan tulang pinggul yang rusak dengan <i>artificial hip joint</i> secara sebagian
<i>Total hip arthroplasty</i>	Operasi penggantian sambungan tulang pinggul yang rusak dengan <i>artificial hip joint</i> secara menyeluruh
<i>Osteolisis</i>	Penyakit hancurnya tulang
Sistem limfatik	Sistem sirkulasi sekunder yang berfungsi mengalirkan limfa dan getah bening ke dalam tubuh
<i>Sitotoksitas</i>	Tingkat merusaknya suatu zat pada sel
<i>Hipersensitivitas</i>	Reaksi berlebihan dari sistem imun tubuh yang tidak diinginkan
<i>Neoplasia</i>	Pertumbuhan yang tidak normal pada bagian tubuh
<i>Dimple</i>	Aplikasi permukaan bertekstur dengan penambahan lubang

<i>Prostusion</i>	Aplikasi permukaan bertekstur dengan penambahan tonjolan
<i>Pendulum hip simulator</i>	Alat pengujian yang dilakukan untuk menganalisa <i>artificial hip joint</i> secara eksperimental
<i>Gait loading</i>	Beban yang diterima oleh sambungan tulang pinggul saat melakukan aktifitas tertentu
Rentang gerak	Besar sudut yang terbentuk dari gerakan sambungan tulang pinggul saat melakukan aktifitas tertentu
<i>Femoral head</i>	Komponen <i>implan</i> pengganti kepala <i>femur</i> pada <i>artificial hip joint</i>
<i>Acetabular cup</i>	Komponen <i>implan</i> pengganti <i>acetabulum</i> pada <i>artificial hip joint</i>
Keausan linear	Keausan yang diukur dari kedalaman keausan yang terbentuk
Keausan volumetrik	Keausan yang diukur dari volume partikel keausan
<i>Tendon</i>	Urat
<i>Ligamen</i>	Tisu berserat penyambung tulang
Ortopedi	Cabang ilmu kedokteran yang mempelajari berbagai jenis gangguan dalam sistem <i>muskuloskeletal</i>
<i>Muskuloskeletal</i>	Kerangka tubuh manusia
<i>Inflamasi Periprostetik</i>	Respon fisiologis tubuh akibat factor eksternal berupa peradangan bagian organ tubuh

DAFTAR LAMBANG

Lambang	Nama	Satuan
W_d	Keausan linear	[mm]
W_v	Keausan volumetrik	[mm ³]
E	Modulus Young	[Pa]
$E_{ekivalen}$	Modulus Young ekivalen	[Pa]
ν	Rasio Poisson	[-]
R_a	Kekasaran permukaan rata-rata	[μ m]
$R_{a,head}$	Kekasaran permukaan <i>femoral head</i> rata-rata	[μ m]
$R_{a,cup}$	Kekasaran permukaan <i>acetabular cup</i> rata-rata	[μ m]
P	Tekanan Kontak	[Pa]
$P_{(h)}$	Distribusi tekanan kontak Hertzian	[Pa]
$P_{o(h)}$	Tekanan kontak maksimum Hertzian	[Pa]
F_n	Beban yang diberikan	[N]
W	Berat	[N]
R	Resultan gaya	[N]
V	Volume spesifik material yang hilang	[mm ³]
A	Luas area kontak	[mm ²]
A_r	Area kontak nyata	[mm ²]
$R_{ekivalen}$	Jari-jari ekivalen	[mm]
R_{cup}	Jari-jari <i>acetabular cup</i>	[mm]
R_{head}	Jari-jari <i>femoral head</i>	[mm]
d_t	Tali busur	[mm]
r	Jari-jari permukaan kontak	[mm]
s	Jarak geser	[mm]
h_{min}	Ketebalan film pelumas minimum	[mm]
F	Gaya gesek	[N]
μ	Koefisien gesek	[-]
T	Torsi gesekan	[Nm]
f	Faktor gesekan	[-]
H	kekerasan material yang lebih lunak	[VH]

k	Koefisien keausan	[mm ³ /Nm]
K	Faktor keausan	[mm ² /N]
η	Kekentalan cairan pelumas	[Ns/m ²]
v	Kecepatan permukaan bantalan	[m/s]
ρ	Massa jenis	[kg/m ³]
λ	Rasio lamda	[-]
z	Angka Sommerfeld	[-]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sambungan tulang pinggul alami adalah salah satu sendi terbesar dan terkuat di tubuh manusia. Sendi ini merupakan tempat dimana tulang paha (*femur*) dan tulang pinggul (*pelvis*) mengartikulasikan satu sama lain (Madeti et al., 2014). Tugas utama dari sambungan tulang pinggul adalah untuk mendukung tubuh bagian atas ketika seseorang berdiri, berjalan, berlari, dan untuk membantu gerakan tertentu, seperti membungkuk dan meregang serta untuk melakukan gerakan secara statis maupun dinamis (Sekhar et al., 2017). Kepala *femur* adalah komponen cembung dari sendi pinggul, dan bagian tersebut ditutupi dengan tulang rawan (*kartilago*). Ini membentuk dua pertiga bola yang mencerminkan tingkat artikulasi tinggi yang disediakan oleh sendi. *Acetabulum* adalah permukaan cekung tulang pinggul. Rongga *acetabulum* juga ditutupi dengan lapisan *kartilago* (Smet et al., 2013). Otot besar dan kuat mengelilingi artikulasi antara kepala *femur* dan *acetabulum*. Dua lapisan *kartilago* di lumasi oleh cairan pelumas yang disebut cairan *synovial*, memungkinkan kepala *femur* berputar bebas dengan berbagai gerakan dalam tiga arah sumbu (Berry, 1982). Sambungan tulang pinggul yang sehat diharapkan dapat bertahan seumur hidup sebagai hasil dari kinerja tinggi dari proses pelumasan yang mencegah kontak antar permukaan secara langsung.

Ada sejumlah penyakit pada sambungan tulang pinggul seperti *osteoarthritis* dan *avascular necrosis* yang menyebabkan degradasi *kartilago* (McGeough, 2013) serta fraktur leher *femur* karena suatu kejadian tertentu (Giannoudis, 2012). Penyakit ini mempengaruhi operasi pelumasan sehingga menyebabkan kehilangan berbagai gerak dan menyebabkan kontak langsung antara kepala *femur* dan *pelvis* yang menyebabkan rasa sakit. Hal tersebut membutuhkan operasi pemulihan dengan melakukan operasi penggantian

sambungan tulang pinggul menggunakan *implan* sambungan tulang pinggul buatan (*artificial hip joint*) dengan prosedur bedah *hip resurfacing* atau *total hip arthroplasty* (Reynolds and Tansey, 2007). Diketahui bahwa *total hip arthroplasty* adalah salah satu metode bedah penggantian sambungan tulang pinggul yang telah sukses dengan biaya efektif untuk menghilangkan rasa sakit dan menstabilkan mobilitas. Operasi penggantian sambungan tulang pinggul terdata sekitar satu juta penggantian sambungan tulang pinggul dilakukan di seluruh dunia setiap tahun (Wilkinson et al., 2001) serta lebih dari 5 juta komponen sambungan tulang pinggul buatan yang dipasang di seluruh dunia (Masson, 2009).

Material yang berbeda telah digunakan untuk menggantikan sambungan tulang pinggul yang rusak dengan *total hip arthroplasty*. Ada empat jenis bantalan pasang (*couple bearing*) yang banyak digunakan, yaitu: *Metal-on-Metal* (MoM), *Metal-on-Polyethylene* (MoP), *Ceramic-on-Ceramic* (CoC), dan *Ceramic-on-Polyethylene* (CoP) yang mana memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing (Affatato, 2014). Bantalan pasang jenis MoM pada *total hip arthroplasty* telah digunakan secara luas karena tingkat keausannya yang rendah hingga 100 kali lipat bila dibandingkan dengan MoP konvensional (Anissian et al., 1999). Sedangkan untuk CoC dan CoP memiliki kekasaran permukaan yang sangat rendah dan ketahanan aus yang tinggi (Rahman et al., 2013), keduanya merupakan karakteristik yang sangat diinginkan. Di sisi lain tingkat kegagalan klinis yang tinggi terutama karena tingginya tingkat fraktur keramik sangat beresiko bagi pengguna (Boutin et al., 1988; Griss and Heimke, 1981; Mittelmeier and Heisel, 1992). Penggunaan kombinasi material *hard-on-soft* seperti MoP dan CoP pernah menjadi pilihan, namun sifat material polietilen yang lembut menurunkan ketahanan jangka panjang *total hip arthroplasty*. Kombinasi material *hard-on-hard* seperti MoM dan CoC menjadi pilihan yang lebih baik, namun mempertimbangkan sifat keramik yang getas dan dapat langsung terjadi kegagalan *implan* akibat fraktur tanpa adanya peringatan terlebih dahulu seperti deformasi pada logam membuat MoM menjadi pilihan terbaik (Sinha, 2002).

MoM menjadi opsi yang baik untuk mengganti sambungan tulang pinggul yang mengalami kerusakan, terutama pada pengguna dengan umur yang lebih muda dan tingkat aktivitas yang lebih tinggi karena memiliki tingkat kesetabilan yang lebih baik (Greco et al., 2006; Ingham and Fisher, 2000) serta dapat bertahan hingga lebih dari 20 tahun (Amstutz et al., 1996). Saat dalam kondisi berjalan normal, tingkat keausan MoM rendah dan kurang dari $0.3 \text{ mm}^3/10^6$ siklus (Firkins et al., 2001) serta menghasilkan partikel kecil berukuran nanometer (Lee et al., 1992). Walaupun MoM memiliki tingkat keausan yang rendah, namun kontak langsung yang terjadi pada MoM dapat melepaskan ion logam dalam aliran darah dan menyebar ke seluruh tubuh hingga menciptakan reaksi peradangan lokal di jaringan, pada akhirnya berkontribusi pada timbulnya *Osteolisis* (Dumbleton et al., 2002). Partikel aus logam dapat menyebar melalui sistem *limfatik* ke lokasi yang jauh dari *implan* dan telah dilaporkan bahwa partikel logam dapat terakumulasi di hati, limpa, kelenjar getah bening dan sumsum tulang penggunaannya (Case et al., 1994, 1996). Bersamaan dengan sifat reaktif partikel aus logam dapat berpotensi menyebabkan *sitotoksitas* (Granchi et al., 2003), *hipersensitivitas* (Granchi et al., 2006), dan *neoplasia* (Doherty et al., 2001). Meminimalisir keausan yang terjadi pada MoM sangat penting untuk menghindari risiko dari efek samping keracunan yang merugikan.

Aplikasi permukaan bertekstur secara luas kita ketahui telah diterapkan pada berbagai komponen mekanika (Etsion, 2005) seperti bantalan aksial (Yushan et al., 2016), bantalan luncur (Zhang et al., 2018), bantalan jurnal (Lin et al., 2018), cincin piston (Ezhilmaran et al., 2018), perapat mekanik (Adjemout et al., 2017), mata pahat mesin perkakas (Sawant et al., 2018) serta berbagai aplikasi lainnya. Dalam bidang Teknik Biomedis terkhusus pada alat *implan*, aplikasi permukaan bertekstur pada *total hip arthroplasty* telah banyak digunakan di permukaan bantalan pasang yang berkontak dengan penambahan *dimple* (Borjali et al., 2017, 2018). Penambahan *dimple* mengurangi luas permukaan yang berkontak dan berdampak pada menurunnya keausan adhesi (Ranjan et al., 1991) dan koefisien gesek (Wei et al., 2016). Penambahan *dimple* juga berfungsi untuk menjebak partikel aus, sehingga mencegah keausan abrasif dari permukaan kontak oleh partikel keras pihak ketiga (*third body*) (Yu et al.,

2018) serta menghasilkan tekanan hidrodinamik untuk memberikan daya angkat tambahan (Yu et al., 2010). Berbagai penelitian juga telah menunjukkan efek positif penambahan *dimple* pada bantalan yang dapat meningkatkan performansi tribologikal yang telah terbukti secara teori maupun eksperimental (Etsion, 2013).

Beberapa parameter yang mempengaruhi efek penambahan *dimple* untuk mengurangi keausan pada *total hip arthroplasty* seperti bentuk, diameter, kedalaman, jarak, arah, dan susunan telah diteliti sebelumnya untuk memaksimalkan efek penambahan *dimple* serta mencari parameter yang optimum. Meskipun begitu, masalahnya sampai saat ini belum ada hasil penelitian yang menentukan kondisi optimum parameter penambahan *dimple* dan biasanya dilakukan dengan metode *trial and error* (Etsion, 2004). Salah satu parameter penambahan *dimple* yang relatif baru dan mulai banyak dikaji oleh banyak peneliti adalah parameter profil bawah (*bottom profile*). Penelitian pada paduan titania Ti-6Al-4V dilakukan oleh Pratap dan Patra (Pratap and Patra, 2018) dengan variasi *bottom profile micro-dimple* datar (*flat*), runcing (*drill*), dan lengkung (*ball*) untuk meningkatkan kemampuan membasahi secara eksperimental menggunakan metode *pin-on-disk* dan diungkapkan bahwa variasi *bottom profile dimple* mempengaruhi keausan yang terjadi pada paduan titania Ti-6Al-4V dengan *ball bottom profile* memberikan pola keausan yang lebih halus jika dibandingkan dengan tanpa penambahan *dimple* dan variasi *bottom profile dimple* lainnya. Variasi *ball bottom profile dimple* juga didapatkan memberikan koefisien gesek paling rendah dengan nilai $\pm 0,16 \mu$ saat pembebanan 10 N, lebih rendah $\pm 20 \%$ jika dibandingkan dengan tanpa penambahan *dimple*. Selain itu Wang et al. (Wang et al., 2018) juga melakukan penelitian pada bantalan aksial dengan variasi 4 jenis *bottom profile dimple* beralur (*groove*) yang berbeda bentuk untuk meneliti karakteristik aliran fluida dalam bantalan aksial secara simulasi menggunakan metode *computational fluid dynamic*. Ditemukan dengan penggunaan *bottom profile dimple* yang berbeda dapat mempengaruhi medan aliran dan menjelaskan hubungan antara bilangan Reynold dengan kavitasi pada masing-masing *bottom profile dimple*. Berdasarkan penelitian tersebut di atas, didapatkan bahwa variasi *bottom profile*

dimple mempengaruhi keausan yang terjadi serta masih memiliki ruang penelitian yang belum dijelajah. Penelitian mengenai pengaruh parameter ini menarik untuk dikaji karena walaupun *dimple* memiliki *bottom profile* yang berbeda namun luas area yang berkontak langsung adalah sama. Terlebih, hingga saat ini penelitian terkait parameter *bottom profile dimple* pada *total hip arthroplasty* belum pernah dilakukan oleh peneliti manapun dan harus dieksplorasi lebih lanjut.

Sebagai indeks kinerja penting dari *total hip arthroplasty*, keausan pada permukaan bantalan pasang yang berkontak harus dipahami secara akurat. Serta berbagai parameter penambahan *dimple* perlu diteliti lebih lanjut untuk mengurangi keausan yang terjadi. Kaji eksperimental sebelumnya telah dilakukan oleh Roy et al. (Roy et al., 2015) dengan meneliti variasi diameter, kedalaman, dan jarak *dimple* dengan pola kotak dan bentuk bulat pada CoC *total hip arthroplasty* menggunakan metode *pin-on-disc* dengan cairan pelumas *synovial*. Selain itu Choudhury et al. (Choudhury et al., 2017) melakukan penelitian eksperimental variasi susunan *micro-dimple* (kotak, segitiga dan lingkaran) berbentuk lingkaran pada MoM dan MoP *total hip arthroplasty* menggunakan *pendulum hip simulator* dengan cairan pelumas *synovial*. Studi bentuk *micro-dimple* juga dilakukan oleh Choudhury et al. (Choudhury et al., 2018) dengan variasi bentuk kotak, segitiga dan elips pada MoM *total hip arthroplasty* menggunakan *pendulum hip simulator* dengan cairan pelumas. Berdasarkan penelitian eksperimental diatas, ditemukan penambahan *dimple* secara signifikan mengurangi keausan yang terjadi bila dibandingkan dengan tanpa penambahan *dimple*. Namun, studi eksperimental biasanya memakan waktu lama dan biaya mahal, terutama terjadi ketika pemahaman yang komprehensif dengan berbagai parameter desain diperlukan.

Metode elemen hingga sebagai alat analisis komputasi yang luar biasa telah banyak digunakan untuk berbagai penelitian *total hip arthroplasty* dan meminimalisir percobaan eksperimental yang mahal. Keunggulan utama dari metode elemen hingga adalah evaluasi akurat dari tekanan kontak (Mattei and Puccio, 2013) serta prediksi keausan jangka waktu lama dengan lebih cepat (Shankar et al., 2015). Untuk mempersingkat proses komputasi yang memakan

waktu, banyak peneliti terkadang menggunakan pembebanan saat berjalan (*gait loading*) dan rentang gerak sambungan tulang pinggul yang sangat disederhanakan dengan beban vertikal yang tidak mewakili fisiologis sambungan tulang pinggul sebenarnya. Sebagai contoh Cosmi et al. (Cosmi et al., 2006), Liu et al. (Liu et al., 2008), Harun et al. (Harun et al., 2009), Meng et al., (Meng et al., 2010), dan Basri et al. (Basri et al., 2019) mempelajari keausan MoM *total hip arthroplasty* dengan metode elemen hingga menggunakan beban vertikal dengan *gait loading* dan rentang gerak yang disederhanakan. Hal ini dapat membatasi hasil yang sebenarnya, terlebih untuk menganalisis pengaruh penambahan *dimple* terhadap keausan dibutuhkan *gait loading* dan rentang gerak sambungan tulang pinggul dalam kondisi sebenarnya.

Tekanan kontak pada permukaan bantalan pasang diketahui sangat penting untuk keausan (Ravikiran and Jahanmir, 2001) dan karenanya mempengaruhi secara signifikan umur penggunaan *total hip arthroplasty* (Wroblewski, 1990). Dalam kegiatan rutin sehari-hari, sambungan tulang pinggul mengalami *gait loading* dan rentang gerak secara 3D (Baker, 2013). Permukaan bantalannya selalu mengalami tekanan kontak yang bervariasi sesuai dengan jenis kegiatan, *gait loading*, dan rentang gerak (Brand, 2005). Pada permukaan yang saling berkontak, semakin tinggi tekanan kontak menyebabkan keausan semakin tinggi dan begitu sebaliknya sehingga mengurangi tekanan kontak merupakan strategi kritis untuk mengurangi keausan dan memperpanjang umur *total hip arthroplasty*. Dikarenakan permukaan bantalan pasang yang berkontak mengalami tekanan kontak yang bervariasi, mengurangi tekanan kontak terutama pada daerah yang mendapat *gait loading* tinggi merupakan langkah strategis untuk mengurangi keausan. Korelasi antara penambahan *dimple* dengan tekanan kontak dan keausan perlu di kaji lebih lanjut.

Pemodelan keausan *total hip arthroplasty* yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya kebanyakan menggunakan cairan pelumas *synovial* untuk mengkaji kondisi sebenarnya (Gao et al., 2010; Noori-Dokht et al., 2017). Padahal studi kontak kering juga penting untuk dilakukan, karena tekanan kontak dapat dilihat lebih menyeluruh dalam kondisi kontak kering dan tekanan kontak merupakan salah satu parameter dari analisa mekanika kontak yang berkaitan dengan

keausan lelah dan kerusakan permukaan kontak (McNie et al., 1998; Rose et al., 1983; Rostoker and Galante, 1979). Pemodelan keausan secara kontak kering sebelumnya pernah dilakukan oleh Meng et al. (Meng et al., 2010) dengan meneliti parameter diameter dan *clearance* permukaan bantalan MoM *total hip arthroplasty*. Selain itu Uddin dan Zhang (Uddin and Zhang, 2013), Shankar dan Nithyaprakash (Shankar and Nithyaprakash, 2014), dan Shankar et al. (Shankar et al., 2015, 2018) juga melakukan pemodelan keausan secara kontak kering untuk memprediksi keausan pada bantalan pasang *hard-on-hard total hip arthroplasty*. Studi keausan secara kontak kering belum memberikan pemahaman yang jelas seutuhnya. Dan juga belum ada penelitian sebelumnya yang melakukan pemodelan keausan secara kontak kering untuk mempelajari pengaruh penambahan *dimple* pada *total hip arthroplasty*.

Berdasarkan penelitian terdahulu, penambahan *dimple* pada permukaan bantalan pasang terbukti dapat mengurangi keausan yang terjadi karena berbagai efek positif yang dimilikinya. Namun hingga kini masih terdapat kegagalan pada *total hip arthroplasty* akibat keausan dan menyebabkan keracunan bagi pengguna menjadikan tantangan tersendiri untuk memaksimalkan efek positif penambahan *dimple* yang perlu dikaji secara komprehensif demi mendapatkan parameter yang optimum. Penelitian terbaru mengenai aplikasi permukaan bertekstur menunjukkan bahwa variasi *bottom profile dimple* mempengaruhi keausan yang terjadi dan hingga saat ini belum ada penelitian parameter *bottom profile dimple* pada *total hip arthroplasty* dan pengaruhnya terhadap keausan perlu diinvestigasi lebih lanjut. Pemodelan keausan secara kontak kering belum memberikan penjelasan secara menyeluruh dimana membutuhkan investigasi lebih lanjut. Kebanyakan peneliti sebelumnya juga masih menggunakan *gait loading* dan rentang gerak sambungan tulang pinggul dengan beban vertikal yang tidak mewakili pemuatan sambungan tulang pinggul secara fisiologis. Dari latar belakang inilah peneliti melakukan penelitian dengan judul “Analisis pengaruh variasi *bottom profile dimple* di permukaan *femoral head* terhadap keausan pada *total hip arthroplasty*”. Penelitian ini melakukan pemodelan keausan secara kontak kering menggunakan metode elemen hingga dengan

variasi *bottom profile dimple* untuk memprediksi keausan pada MoM *total hip arthroplasty* dengan *gait loading* dan rentang gerak secara 3D.

1.2 Rumusan Masalah

MoM dipilih mengingat sejumlah kelebihan yang dimilikinya jika dibandingkan dengan jenis bantalan pasang lainnya seperti memiliki kekerasan yang tinggi, tidak mudah aus, memiliki umur alat yang panjang, serta tidak mudah retak. Walaupun MoM menghasilkan jumlah partikel aus yang sangat sedikit, namun hal ini masih menjadi permasalahan utama pada pengguna yang menjalankan operasi penggantian sambungan tulang pinggul karena dapat menyebabkan keracunan akibat ion logam yang masuk dalam tubuh dan mengakibatkan kegagalan alat *implan* (Mccarthy et al., 2017). Penambahan *dimple* pada permukaan bantalan pasang MoM telah dilakukan oleh banyak peneliti sebelumnya untuk mengurangi kontak permukaan langsung dan terbukti dapat mengurangi keausan dengan berbagai penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan parameter *dimple* yang optimum. Namun hingga saat ini dilaporkan masih terjadi kegagalan alat *implan* akibat keausan dan keracunan ion logam. Parameter *bottom profile dimple* pada *total hip arthroplasty* hingga kini belum pernah dilakukan oleh peneliti manapun dan harus dikaji lebih lanjut untuk mendapatkan parameter yang optimum serta mengetahui pengaruhnya terhadap keausan. Pemodelan keausan secara kontak kering menggunakan metode elemen hingga dilakukan dengan penambahan *dimple* pada MoM *total hip arthroplasty* dengan variasi *bottom profile flat*, *drill*, dan *ball*. Pemahaman secara mendalam dilakukan untuk mencari tekanan kontak yang lebih rendah dimana mengindikasikan tingkat keausan yang lebih rendah dengan *gait loading* dan rentang gerak secara 3D yang menyerupai kondisi aktual untuk mengembangkan simulasi komputasi keausan dari *total hip arthroplasty* dengan siklus berjalan normal.

1.3 Batasan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian pada Skripsi ini adalah sebagai berikut.

1. Pemodelan geometri *acetabular cup* dan *femoral head* menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2018 Premium Edition.
2. Proses *meshing* geometri *acetabular cup* dan *femoral head* menggunakan perangkat lunak Altair Hyperworks - Hypermesh 2018.
3. Analisa tekanan kontak menggunakan perangkat lunak Abaqus/CAE 6.14-1.
4. Sambungan tulang pinggul yang diteliti adalah *total hip arthroplasty*.
5. Analisa tekanan kontak dan keausan dikhususkan pada permukaan kontak *acetabular cup*.
6. Pemodelan kontak *acetabular cup* dan *femoral head* menggunakan model 3D *ball-in-socket*.
7. Penambahan *dimple* terdapat pada permukaan *femoral head*.
8. Variasi *bottom profile* pada *dimple* berjenis *flat*, *ball*, dan *drill*.
9. *Adaptive remeshing* diterapkan untuk perubahan geometri selama simulasi berlangsung.
10. Simulasi prediksi keausan dilakukan dalam jangka waktu dua tahun pemakaian *implan*.
11. *Gait loading* dan rentang gerak secara 3D digunakan pada kondisi siklus berjalan normal dengan jumlah 32 fase dalam satu siklus.
12. Analisa pada penelitian ini tidak termasuk uji mekanik secara fisik dan pembuatan perangkat.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian pada Skripsi ini adalah sebagai berikut.

1. Menghitung distribusi tekanan kontak di *acetabular cup* dalam kondisi kontak kering dengan menggunakan metode elemen hingga tanpa dan dengan variasi *bottom profile dimple*.
2. Memprediksi keausan linear dan volumetrik yang terjadi pada *acetabular cup* tanpa dan dengan variasi *bottom profile dimple*.
3. Mencari model keausan *total hip arthroplasty* tanpa dan dengan variasi *bottom profile dimple*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian pada Skripsi ini adalah sebagai berikut.

4. Sebagai kontribusi untuk perkembangan ilmu Biomekanika dan Biotribologi di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
5. Mampu memberikan pengetahuan secara umum dan mendasar mengenai aplikasi permukaan bertekstur pada alat *implan* medis.
6. Menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya mengenai pengaruh parameter penambahan *dimple* terhadap keausan pada *total hip arthroplasty*.

DAFTAR RUJUKAN

- ABAQUS, 2008. ABAQUS/CAE User's Manual. Amerika Serikat: Dassault Systèmes.
- Adjemout, M., Andrieux, A., Bouyer, J., Brunetière, N., Marcos, G., and Czerwiec, T., 2017. Influence of the real dimple shape on the performance of a textured mechanical seal. *Tribology International*, 115, 409–416. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.06.010
- Affatato, S., 2012. *Wear of orthopaedic implants and artificial joints. Wear of Orthopaedic Implants and Artificial Joints* (First Edit.). Oxford. DOI: 10.1533/9780857096128
- Affatato, S., 2014. *Perspectives in Total Hip Arthroplasty* (First Edit.). Cambridge: Woodhead Publishing. DOI: 10.1533/9781782420392.1.3
- Amstutz, H. C., Campbell, P., Mckellop, H., Schmalzried, T. I., and Gillespie, W. J., 1996. Metal on Metal Total Hip Replacement Workshop Consensus Document. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (3298), 297–303. DOI: 10.1097/00003086-199608001-00027
- Anissian, H. L., Stark, A., Gustafson, A., Good, V., and Clarke, I. C., 1999. Metal-on-metal bearing in hip prosthesis generates 100-fold less wear debris than metal-on-polyethylene. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 70(6), 578–582. DOI: 10.3109/17453679908997845
- Apkarian, J., Naumann, S., and Cairns, B., 1989. A three-dimensional kinematic and dynamic model of the lower limb. *Journal Biomechanics*, 22(2), 143–155. DOI: 10.1016/0021-9290(89)90037-7
- Archard, J. F., 1953. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988. DOI: 10.1063/1.1721448
- Bachtar, F., Chen, X., and Hisada, T., 2006. Finite element contact analysis of the hip joint. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 44(8), 643–651. DOI: 10.1007/s11517-006-0074-9
- Baker, R., 2013. *Measuring Walking: A Handbook of Clinical Gait Analysis. Animal Genetics* (First Edit., Vol. 39). London: Mac Keith Press.
- Bartel, D. L., Burstein, A. H., Toda, M. D., and Edwards, D. L., 1985. The Effect of Conformity and Plastic Thickness on Contact Stress in Metal-Backed Plastic Implant. *Journal of Biomechanical Engineering*, 107(3), 193. DOI: 10.1115/1.3138543
- Basri, H., Syahrom, A., Prakoso, A. T., Wicaksono, D., and Amarullah, M. I., 2019. The Analysis of Dimple Geometry on Artificial Hip Joint to the Performance of Lubrication. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198(1198), 1–10. DOI: 10.1088/1742-6596/1198/4/042012

- Bathe, K.-J., 2014. *Finit Elements Procedures* (Second Edi.). Watertown: Prentice Hall.
- Beck, T. J., Looker, A. C., Ruff, C. B., Sievanen, H., Wahner, H. W., and Al, B. E. T., 2000. Structural Trends in the Aging Femoral Neck and Proximal Shaft: Analysis of the Third National Health and Nutrition Examination Survey Dual-Energy X-Ray Absorptiometry Data. *American Society for Bone and Mineral Research*, 15(12), 2297–2304. DOI: 10.1359/jbmr.2000.15.12.2297
- Bergmann, G., Deuretzbacher, G., Heller, M., Graichen, F., and Rohlmann, A., 2001. Hip contact and gait patterns from routine activities. *Journal of Biomechanics*, 34, 859–871. DOI: 10.1016/S0021-9290(01)00040-9
- Bergmann, G., Graichen, F., and Rohlmann, A., 1993. Hip joint loading during walking and running, measured in two patients. *Journal of Biomechanics*, 26(8), 969–990. DOI: 10.1016/0021-9290(93)90058-M
- Berry, C. L., 1982. *Bone and Joint Disease* (First Edit.). New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Besong, A. A., Lee, R., Farrar, R., and Jin, Z. M., 2001. Contact mechanics of a novel metal-on-metal total hip replacement. *Journal of Engineering in Medicine*, 215(6), 543–548. DOI: 10.1243/0954411011536145
- Bizot, P., Nizard, R., Hamadouche, M., Hannouche, D., and Sedel, L., 2001. Prevention of Wear and Osteolysis: Alumina-on-Alumina Bearing. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (393), 85–93.
- Boone, D. C., and Azen, S. P., 1979. Normal Range of Motion of Joints in Male Subjects. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 756–759.
- Borjali, A., Langhorn, J., Monson, K., and Raeymaekers, B., 2017. Using a patterned microtexture to reduce polyethylene wear in metal-on-polyethylene prosthetic bearing couples. *Wear*, 392–393, 77–83. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.wear.2017.09.014
- Borjali, A., Monson, K., and Raeymaekers, B., 2018. Friction between a polyethylene pin and a microtextured CoCrMo disc, and its correlation to polyethylene wear, as a function of sliding velocity and contact pressure, in the context of metal-on-polyethylene prosthetic hip implants. *Tribology International*, 127(June), 568–574. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.07.005
- Boutin, P., 2014. Total arthroplasty of the hip by fritted alumina prosthesis . Experimental study and 1st clinical applications. *Orthopaedics & Traumatology: Surgery & Research*, 100(1), 15–21. Elsevier Masson SAS. DOI: 10.1016/j.otsr.2013.12.004
- Boutin, P., Christel, P., Dorlot, J. M., Meunier, A., de Roquancourt, A., Blanquaert, D., Herman, S., et al., 1988. The use of dense alumina-alumina ceramic combination in total hip replacement. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 22(12), 1203–1232. DOI: 10.1088/0953-8984/12/22/310

- Bowsher, J. G., and Shelton, J. C., 2001. A hip simulator study of the influence of patient activity level on the wear of crosslinked polyethylene under smooth and roughened femoral conditions. *Wear*, 250(1–12), 167–179. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00619-6
- Brand, R. A., 2005. Joint Contact Stress: A Reasonable Surrogate for Biological Processes? *Iowa Orthopedic Journal*, 25, 82–94. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16089079>
- Brand, R. A., Pedersen, D. R., Davy, D. T., Kotzar, G. M., Heiple, K. G., and Goldberg, V. M., 1994. Comparison of Hip Force Calculations and Measurements in the Same Patient. *The Journal of Arthroplasty*, 9(1), 45–51. DOI: 10.1016/0883-5403(94)90136-8
- Breusch, S., and Malchau, H., 2005. *The well-cemented total hip arthroplasty: Theory and practice. The Well-Cemented Total Hip Arthroplasty: Theory and Practice* (First Edit.). DOI: 10.1007/3-540-28924-0
- Brockett, C. L., John, G., Williams, S., Jin, Z., Isaac, G. H., and Fisher, J., 2012. Wear of ceramic-on-carbon fiber-reinforced poly-ether ether ketone hip replacements. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B: Applied Biomaterials*, 100B(6), 1459–1465. DOI: 10.1002/jbm.b.32664
- Brodner, W., Resident, O., Bitzan, P., Resident, O., Kotz, R., Meisinger, V., and Kaider, A., 1997. Evaluated serum cobalt with metal-on-metal articulating surface. *Journal of Bone and Joint Surgery*, 79-B(2), 316–321. DOI: 10.1302/0301-620X.79B2.0790316
- Bronner, F., and Farach-Carson, M. C., 2007. *Bone and Osteoarthritis*. (F. Edition, Ed.). London: Springer.
- Brown, S. S., and Clarke, I. C., 2006. A review of lubrication conditions for wear simulation in artificial hip replacements. *Tribology Transactions*, 49(1), 72–78. DOI: 10.1080/05698190500519223
- Buechel, F. F., and Pappas, M. J., 2015. *Principles of Human Joint Replacement: Design and Clinical Application* (First Edit.). Switzerland: Springer.
- Buschow, K. H. J., Cahn, R., Flemings, M. C., Ilschner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S., and Veyssiere, P., 2001. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (First Edit.). Oxford: Elsevier.
- Byrd, J. W. T., 2013. *Operative Hip Arthroscopy* (Third Edit.). London: Springer.
- Callaghan, J. J., Rosemberg, A. G., and Rubash, H. E., 2015. *The Adult Hip: Hip Arthroplasty Surgery* (Third Edit.). Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Carter, D. R., Vasu, R., and Harris, W. H., 1982. Stress distributions in the acetabular region-II. effects of cement thickness and metal backing of the total hip acetabular component. *Journal of Biomechanics*, 15(3), 165–170. DOI: 10.1016/0021-9290(82)90248-2
- Case, C. P., Langkamer, V. G., Howell, R. T., Webb, J., Standen, G., Palmer, M., Kemp, A., et al., 1996. Preliminary observations on possible premalignant changes in bone marrow adjacent to worn total hip

- arthroplasty implants. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (329 SUPPL.), 269–279. DOI: 10.1097/00003086-199608001-00024
- Case, C. P., Langkamer, V. G., James, C., Palmer, M. R., Kemp, A. J., Heap, P. F., and Solomon, L., 1994. Widespread dissemination of metal debris from implants. *The Journal of bone and joint surgery*, 76(5), 701–712. DOI: 10.1109/HICSS.2011.103
- Chan, F. W., Bobyn, J. D., Medley, J. B., Krygier, J. J., and Tanzer, M., 1999. Wear and Lubrication of Metal-on-Metal Hip Implants. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (369), 10–24.
- Charnley, J., 1972. The Long-Term Result of Low-Friction Arthroplasty of The Hip Performed as A Primary Intervention. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 54-B(1), 61–76. DOI: 10.1302/0301-620X.54B1.61
- Chethan, K. N., N, S. B., and B, S. S., 2018. Biomechanics of hip joint : a systematic review. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3), 1672–1676. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.15231
- Choudhury, D., Rebenda, D., Sasaki, S., Hekrle, P., Vrbka, M., and Zou, M., 2018. Enhanced lubricant film formation through micro-dimpled hard-on-hard artificial hip joint: An in-situ observation of dimple shape effects. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 81, 120–129. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2018.02.014
- Choudhury, D., Vrbka, M., Mamat, A. Bin, Stavness, I., Roy, C. K., Mootanah, R., and Krupka, I., 2017. The impact of surface and geometry on coefficient of friction of artificial hip joints. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 72, 192–199. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2017.05.011
- Clarke, I. C., Good, V., Williams, P., Schroeder, D., Anissian, L., Stark, A., Oonishi, H., et al., 2000. Ultra-low wear rates for rigid-on-rigid bearings in total hip replacements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 214(4), 331–347. DOI: 10.1243/0954411001535381
- Coles, J. M., Chang, D. P., and Zauscher, S., 2010. Molecular mechanisms of aqueous boundary lubrication by mucinous glycoproteins. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 15(6), 406–416. Elsevier. DOI: 10.1016/j.cocis.2010.07.002
- Cosmi, F., Hoglevina, M., Fancellu, G., and Martinelli, B., 2006. A finite element method comparison of wear in two metal-on-metal total hip prostheses. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 220, 871–879. DOI: 10.1243/09544119JEIM148
- Crowninshield, R. D., Johnston, R. C., Andrews, J. G., and Brand, R. A., 1978. A Biomechanical Investigation of The Human Hip. *Journal Biomechanics*, 11(1–2), 75–85. DOI: 10.1016/0021-9290(78)90045-3
- Cuckler, J. M., 2005. The Rationale for Metal-on-Metal Total Hip Arthroplasty. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (441), 132–136. DOI:

10.1097/01.blo.0000193809.85587.f8

- Dalstra, M., Huiskes, R., and van Erning, L., 1995. Development and Validation of a Three-Dimensional Finite Element Model of the Pelvic Bone. *Journal of Biomechanical Engineering*, 117(3), 272–278. DOI: 10.1115/1.2794181
- Daud, R., Ra, M., Kadir, A., Izman, S., Saad, A. P., Lee, M. H., and Ahmad, A. C., 2013. The Journal of Foot & Ankle Surgery Three-Dimensional Morphometric Study of the Trapezium Shape of the Trochlea Tali. *The Journal of Foot & Ankle Surgery*, 52, 426–431. DOI: 10.1053/j.jfas.2013.03.007
- Doherty, A. T., Howell, R. T., Ellis, L. A., Bisbinas, I., Learmonth, I. D., Newson, R., and Case, C. P., 2001. Increased chromosome translocations and aneuploidy in peripheral blood lymphocytes of patients having revision arthroplasty of the hip. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series B*, 83(7), 1075–1081. DOI: 10.1302/0301-620X.83B7.10102
- Dopico-gonza, C., New, A. M., and Browne, M., 2010. Probabilistic finite element analysis of the uncemented hip replacement — effect of femur characteristics and implant design geometry. *Journal of Biomechanics*, 43, 512–520. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.09.039
- Dowson, D., 2001. New joints for the Millennium: Wear control in total replacement hip joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* (Vol. 215, pp. 335–358). DOI: 10.1243/0954411011535939
- Dowson, D., McNie, C. M., and Goldsmith, A. A. J., 2000. Direct experimental evidence of lubrication in a metal-on-metal total hip replacement tested in a joint simulator. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 214(1), 75–86. DOI: 10.1243/0954406001522822
- Duda, G. N., Schneider, E., Chaot, E. Y. S., and Section, B., 1997. Internal Forces and Moments in The Femur During Walking. *Journal Biomechanics*, 30(9), 933–941. DOI: 10.1016/S0021-9290(97)00057-2
- Dumbleton, J. H., 1981. *Tribology of Natural and Artificial Joints* (First Edit.). Amsterdam: Elsevier.
- Dumbleton, J. H., Manley, M. T., and Edidin, A. A., 2002. A literature review of the association between wear rate and osteolysis in total hip arthroplasty. *Journal of Arthroplasty*, 17(5), 649–661. DOI: 10.1054/arth.2002.33664
- Ebramzadeh, E., Sangiorgio, S. N., Lattuada, F., Kang, J. S., Chiesa, R., McKellop, H. A., and Dorr, L. D., 2003. Accuracy of Measurement of Polyethylene Wear with use of Radiographs of Total Hip Replacements. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A*, 85(12), 2378–2384. DOI: 10.2106/00004623-200312000-00016
- Emglish, T. A., and Kilvington, M., 1979. In vivo records of hip load using a femoral implant with telemetric output. *Journal of Biomedical Engineering*, 1(2), 111–115. DOI: 10.1016/0141-5425(79)90066-9
- Esch, D., and Lepley, M., 1974. *Evaluation of Joint Motion Methods of*

- Measurement and Recording* (First Edit.). Minnesota: University of Minnesota Press.
- Essner, A., Sutton, K., and Wang, A., 2005. Hip simulator wear comparison of metal-on-metal, ceramic-on-ceramic and crosslinked UHMWPE bearings. *Wear*, 259(7–12), 992–995. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.104
- Etsion, I., 2004. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing. *Tribology Letters*, 17(4), 733–737. DOI: 10.1007/s11249-004-8081-1
- Etsion, I., 2005. State of the Art in Laser Surface Texturing. *Journal of Tribology*, 127(1), 248. DOI: 10.1115/1.1828070
- Etsion, I., 2013. Modeling of surface texturing in hydrodynamic lubrication. *Friction*, 1(3), 195–209. DOI: 10.1007/s40544-013-0018-y
- Ezhilmaran, V., Vasa, N. J., and Vijayaraghavan, L., 2018. Investigation on generation of laser assisted dimples on piston ring surface and influence of dimple parameters on friction. *Surface and Coatings Technology*, 335(July 2017), 314–326. Elsevier. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.12.052
- Firestein, G. S., Budd, R. C., Gabriel, S. E., Mcinnes, I. B., and O'dell, J. R., 2013. *Kelley's Textbook of Rheumatology* (Ninth Edit.). Philadelphia.
- Firkins, P. J., Tipper, J. L., Ingham, E., Stone, M. H., Farrar, R., and Fisher, J., 2001. A novel low wearing differential hardness, ceramic-on-metal hip joint prosthesis. *Journal of Biomechanics*, 34(10), 1291–8. DOI: 10.1016/S0021-9290(01)00096-3
- Fischer-Cripps, A. C., 2007. *Introduction to Contact Mechanics* (Second Edi.). Lindfield: Springer.
- Fox, A. J. S., Bedi, A., and Rodeo, S. A., 2009. The Basic Science of Articular Cartilage : Structure, Composition, and Function. *Sports Health*, 1(6), 461–468. DOI: 10.1177/1941738109350438
- Fraysse, F., Dumas, R., Cheze, L., Wang, X., Lyon, D., and Lyon, F., 2009. Comparison of global and joint-to-joint methods for estimating the hip joint load and the muscle forces during walking. *Journal of Biomechanics*, 42(14), 2357–2362. Elsevier. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.06.056
- Gao, L., Dowson, D., and Hewson, R. W., 2015. Predictive wear modeling of the articulating metal-on-metal hip replacements. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 105(3), 497–506. DOI: 10.1002/jbm.b.33568
- Gao, L., Wang, F., Yang, P., and Jin, Z., 2009. Medical Engineering & Physics Effect of 3D physiological loading and motion on elastohydrodynamic lubrication of metal-on-metal total hip replacements. *Medical Engineering and Physics*, 31(6), 720–729. DOI: 10.1016/j.medengphy.2009.02.002
- Gao, L., Yang, P., Dymond, I., Fisher, J., and Jin, Z., 2010. Effect of surface texturing on the elastohydrodynamic lubrication analysis of metal-on-metal hip implants. *Tribology International*, 43(10), 1851–1860. Elsevier. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.02.006

- Germain, M. A., Hatton, A., Williams, S., Matthews, J. B., Stone, M. H., Fisher, J., and Ingham, E., 2003. Comparison of the cytotoxicity of clinically relevant cobalt-chromium and alumina ceramic wear particles in vitro. *Biomaterials*, 24(3), 469–479. DOI: 10.1016/S0142-9612(02)00360-5
- Giannoudis, P. V., 2012. *Practical Procedures in Elective Orthopaedic Surgery* (First Edit.). London: Springer. DOI: 10.1007/978-0-85729-814-0
- Gore, T. A., Higginsons, G. R., and Stevens, J., 1984. The kinematics Of hip joints : normal functioning. *Clinical Physics and Physiological*, 5(4), 233–252. DOI: 10.1088/0143-0815/5/4/001
- Granchi, D., Cenni, E., Trisolino, G., Giunti, A., and Baldini, N., 2006. Sensitivity to implant materials in patients undergoing total hip replacement. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 77(2), 257–264. DOI: 10.1002/jbm.b.30445
- Granchi, D., Savarino, L., Ciapetti, G., Cenni, E., Rotini, R., Mieti, M., Baldini, N., et al., 2003. Immunological changes in patients with primary osteoarthritis of the hip after total joint replacement. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 85-B, 758–764. DOI: 10.1302/0301-620X.85B5.13729
- Greco, M., Cenni, E., Cavasinni, L., Rotini, R., Baldini, N., and Giunti, A., 2006. Differences in ion release after ceramic-on- ceramic and metal-on-metal total hip replacement. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 88-B(4), 472–476. DOI: 10.1302/0301-620X.88B4.17333
- Greenwald, A. S., and Garino, J. P., 2001. Alternative Bearing Surfaces: The Good, the Bad, and the Ugly. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 83(2), 68–72.
- Griss, P., and Heimke, G., 1981. Five years experience with ceramic-metal-composite hip endoprostheses. I. Clinical evaluation. *Arch Orthop Trauma Surg*, 98(3), 157–164. DOI: 10.1007/bf00632972
- Harris, W. H., 1994. Osteolysis and particle disease in hip replacement: A review. *Acta Orthopaedica*, 65(1), 113–123. DOI: 10.3109/17453679408993734
- Harun, M. N., Wang, F. C., Jin, Z. M., and Fisher, J., 2009. Long-term contact-coupled wear prediction for metal-on-metal total hip joint replacement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 223(7), 993–1001. DOI: 10.1243/13506501JET592
- Hashimoto, N., Ando, M., Yayama, T., Uchida, K., Kobayashi, S., Negoro, K., and Baba, H., 2005. Dynamic Analysis of the Resultant Force Acting on the Hip Joint During Level Walking. *Artificial Organs*, 29(5), 387–392. DOI: 10.1111/j.1525-1594.2005.29065.x
- Hasirci, V., and Hasirci, N., 2018. *Fundamentals of Biomaterials* (First Edit.). New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4939-8856-3
- Heller, M. O., Bergmann, G., Deuretzbacher, G., Pohl, M., Claes, L., Haas, N. P., and Duda, G. N., 2001. Musculo-skeletal loading conditions at the hip

- during walking and stair climbing. *Journal of Biomechanics*, 34(7), 883–893. DOI: 10.1016/S0021-9290(01)00039-2
- Henriques, B., Soares, D., and Silva, F. S., 2012. Microstructure , hardness , corrosion resistance and porcelain shear bond strength comparison between cast and hot pressed CoCrMo alloy for metal – ceramic dental restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 12, 83–92. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2012.03.015
- Hertz, H., 1896. *Hertz's Miscellaneous Papers* (First Edit.). London: Macmillan.
- Hutchings, I., and Shipway, P., 2016. *Tribology-Friction and wear of Engineering Materials* (Second Edi.). Oxford: Butterworth-Heinemann. Retrieved from <https://www.elsevier.com/books-and-journals>
- I. Etsion, and Burstein, L., 1996. A Model for Mechanical Seals with Regular Microsurface Structure. *Tribology Transactions*, 39(3), 677–683. DOI: 10.1080/10402009608983582
- Iglič, A., Antolič, V., and Srakar, F., 1993. Biomechanical analysis of various operative hip joint rotation center shifts, 124–126. DOI: 10.1007/BF00449986
- Ingham, E., and Fisher, J., 2000. Biological reactions to wear debris in total joint replacement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* (Vol. 214, pp. 21–37). DOI: 0.1243/0954411001535219
- Ingham, E., and Fisher, J., 2005. The role of macrophages in osteolysis of total joint replacement. *Biomaterials*, 26(11), 1271–1286. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2004.04.035
- Isacson, H., Lennart Gransberg, and Knutsson, E., 1986. Three-Dimensional Electrogoniometric Gait Recording. *Journal Biomechanics*, 19(8), 1986. DOI: 10.1016/0021-9290(86)90168-5
- Ito, H., Kaneda, K., Yuhta, T., Nishimura, I., Yasuda, K., and Matsuno, T., 2000. Reduction of polyethylene wear by concave dimples on the frictional surface in artificial hip joints. *Journal of Arthroplasty*, 15(3), 332–338. DOI: 10.1016/S0883-5403(00)90670-3
- Iyer, K. M., 2014. *The Hip Joint*. Pan Stanford: Taylor & Francis. Retrieved from <http://teachmeanatomy.info/lower-limb/joints/the-hip-joint/>
- Jamari, J., 2006. *Running-in of rolling contacts*. University of Twente. University of Twente.
- Jameson, S. S., Langton, D. J., Natsu, S., and Nargol, T. V. F., 2008. The Influence of Age and Sex on Early Clinical Results After Hip Resurfacing. An Independent Center Analysis. *Journal of Arthroplasty*, 23(6 SUPPL.), 50–55. DOI: 10.1016/j.arth.2008.03.019
- Jhurani, S. M., and Higgs, C. F., 2010. An elastohydrodynamic lubrication (EHL) model of wear particle migration in an artificial hip joint. *Tribology International*, 43(8), 1326–1338. Elsevier. DOI: 10.1016/j.triboint.2009.12.069

- Jin, Z. M., Heng, S. M., Ng, H. W., and Auger, D. D., 1999. An axisymmetric contact model of ultra high molecular weight polyethylene cups against metallic femoral heads for artificial hip joint replacements. *Journal Engineering in Medicine*, 213(4), 317–327. DOI: 10.1243/0954411991535158
- Jin, Z. M., Medley, J. B., and Dowson, D., 2003. Fluid film lubrication in artificial hip joints. *Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology* (pp. 237–256). DOI: 10.1016/S0167-8922(03)80136-0
- Jin, Z. M., Stone, M., Ingham, E., and Fisher, J., 2006. (v) Biotribology. *Current Orthopaedics*, 20(1), 32–40. DOI: 10.1016/j.cuor.2005.09.005
- Joshi, M. G., Santare, M. H., and Advani, S. G., 2000. Survey of stress analyses of the femoral hip prosthesis. *Applied Mechanics Reviews*, 53(1), 1–19. DOI: 10.1115/1.3097335
- Jourdan, F., and Samida, A., 2009. An implicit numerical method for wear modeling applied to a hip joint prosthesis problem. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198(27–29), 2209–2217. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.cma.2009.02.017
- Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., and Wootten, M. E., 1990. Measurement of Lower Extremity Kinematics During Level Walking. *Journal of Orthopaedic Research*, 8, 383–392. DOI: 10.1002/jor.1100080310
- Kang, L., Galvin, A. L., Brown, T. D., Fisher, J., and Jin, Z. M., 2015. Wear simulation of ultra-high molecular weight polyethylene hip implants by incorporating the effects of cross-shear and contact pressure. *Journal Engineering in Medicine*, 222(7), 1049–1064. DOI: 10.1243/09544119JEIM431
- Kang, M., Park, Y. M., Kim, B. H., and Seo, Y. H., 2015. Micro- and nanoscale surface texturing effects on surface friction. *Applied Surface Science*, 345, 344–348. Elsevier B.V. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.03.194
- Karpiński, R., Jaworski, Ł., and Zubrzycki, J., 2016. Structural Analysis of Articular Cartilage of the Hip Joint Using Finite Element Method. *Advances in Science and Technology*, 10(31), 240–246. DOI: 10.12913/22998624/64064
- Kligerman, Y., Etsion, I., and Shinkarenko, A., 2005. Improving Tribological Performance of Piston Rings by Partial Surface Texturing. *Journal of Tribology*, 127(3), 632–638. DOI: 10.1115/1.1866171
- Knight, S. R., Aujla, R., and Biswas, S. P., 2011. Total Hip Arthroplasty – over 100 years of operative history. *Orthopedic Reviews*, 3(2), 16. DOI: 10.4081/or.2011.e16
- Korhonen, R. K., Koistinen, A., Kontinen, Y. T., Santavirta, S. S., and Lappalainen, R., 2005. The effect of geometry and abduction angle on the stresses in cemented UHMWPE acetabular cups – finite element simulations and experimental tests. *BioMedical Engineering Online*, 4(32), 1–14. DOI: 10.1186/1475-925X-4-32

- Kurtz, S. M., 2016. *UHMWPE Biomaterials Handbook* (Third Edit.). Oxford: Elsevier. DOI: 10.1016/C2013-0-16083-7
- Lee, J.-M., Salvati, E. A., Betts, F., Dicarolo, E. F., Doty, S. B., and Bullough, P. G., 1992. Size of metallic and polyethylene debris particles in failed cemented total hip replacements. *J Bone Joint Surg Am*, 74-B(3), 380–384. DOI: 10.1080/j.1440-1614.2004.01469.x
- Levy, J. H., 2010. *Biomechanics: Principles, Trends and Applications* (First Edit.). New York: Nova Science Publisher.
- Lievensse, A. M., Verhagen, A. P., Baar, M. E. Van, Verhaar, J. A. N., and Koes, B. W., 2002. Influence of obesity on the development of osteoarthritis of the hip: a systematic review. *Rheumatology*, 41, 1155–1162. DOI: 10.1093/rheumatology/41.10.1155
- Lin, Q., Bao, Q., Li, K., Khonsari, M. M., and Zhao, H., 2018. An investigation into the transient behavior of journal bearing with surface texture based on fluid-structure interaction approach. *Tribology International*, 118(July 2017), 246–255. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.09.026
- Liu, F., Galvin, A., Jin, Z., and Fisher, J., 2010. A new formulation for the prediction of polyethylene wear in artificial hip joints. *Journal Engineering in Medicine*, 225(Part H), 16–24. DOI: 10.1243/09544119JEIM819
- Liu, F., Leslie, I., Williams, S., Fisher, J., and Jin, Z., 2008. Development of computational wear simulation of metal-on-metal hip resurfacing replacements. *Journal of Biomechanics*, 41(3), 686–694. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2007.09.020
- Macpherson, G. J., and Breusch, S. J., 2011. Metal-on-metal hip resurfacing: a critical review. *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery*, 131(1), 101–110. DOI: 10.1007/s00402-010-1153-9
- Madeti, B. K., Rao, C. S., and Rao, B. S. K. S. S., 2014. Biomechanics of hip joint: a review. *International Journal of Biomedical Engineering and Technology*, 15(4), 341. DOI: 10.1504/IJBET.2014.064824
- Magnenat-Thalmann, N., Ratib, O., and Choi, H. F., 2014. *3D multiscale physiological human. 3D Multiscale Physiological Human* (First Edit.). New York: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4471-6275-9
- Mak, M. M., Besong, A. A., Jin, Z. M., and Fisher, J., 2002. Effect of microseparation on contact mechanics in ceramic-on-ceramic hip joint replacements. *Journal Engineering in Medicine*, 216(6), 403–408. DOI: 10.1243/095441102321032193
- Mak, M. M., and Jin, Z. M., 2002. Analysis of contact mechanics in ceramic-on-ceramic hip joint replacements. *Journal of Engineering in Medicine*, 216(4), 231–236. DOI: 10.1243/09544110260138718
- Manley, M. T., Ong, K. L., and Kurtz, S. M., 2006. The potential for bone loss in acetabular structures following THA. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (453), 246–253. DOI: 10.1097/01.blo.0000238855.54239.fd
- Masson, B., 2009. Emergence of the alumina matrix composite in total hip

- arthroplasty. *International Orthopaedics*, 33(2), 359–363. DOI: 10.1007/s00264-007-0484-9
- Mattei, L., and Puccio, F. Di, 2013. Wear Simulation of Metal-on- Metal Hip Replacements With Frictional Contact. *Journal of Tribology*, 135(April), 1–11. DOI: 10.1115/1.4023207
- Mattei, L., Puccio, F. Di, Piccigallo, B., and Ciulli, E., 2011. Lubrication and wear modelling of artificial hip joints : A review. *Tribology International*, 44(5), 532–549. Elsevier. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.06.010
- Maxian, T. A., Brown, T. D., Pedersen, D. R., and Callaghan, J. J., 1996a. A sliding-distance-coupled finite element formulation for polyethylene wear in total hip arthroplasty. *Journal of Biomechanics*, 29(5), 687–692. DOI: 10.1016/0021-9290(95)00125-5
- Maxian, T. A., Brown, T. D., Pedersen, D. R., and Callaghan, J. J., 1996b. The Frank Stinchfield Award: 3-Dimensional Sliding/Contact Computational Simulation of Total Hip Wear. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 41–50. DOI: 10.1097/00003086-199612000-00005
- Mccarthy, J. C., Noble, P. C., and Villar, R. N., 2017. *Hip Joint Restoration: Worldwide Advances in Arthroscopy, Arthroplasty, Osteotomy and Joint Preservation Surgery* (First Edit.). Springer.
- McGee, S., 2018. *Evidence-Based Physical Diagnosis* (Fourth Edi.). Philadelphia: Elsevier.
- Mcgeough, J. A., 2013. *The Engineering of Human Joint Replacements* (First Edit.). Chichester: John Wiley & Sons.
- Mckeen, L. W., 2016. *Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers* (First Edit.). Oxford: Elsevier.
- McNie, C., Barton, D. C., Stone, M. H., and Fisher, J., 1998. Prediction of plastic strains in ultra-high molecular weight polyethylene due to microscopic asperity interactions during sliding wear. *Journal of Engineering in Medicine*, 212(1), 49–56. DOI: 10.1243/0954411981533818
- Medley, J. B., Chan, F. W., Krygier, J. J., and Boby, D., 1996. Comparison of alloys and designs in a hip simulator study of metal on metal implants. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (329 SUPPL.), 148–159. DOI: 10.1097/00003086-199608001-00015
- Melton, L. J., Wahner, H. W., Richelson, L. S., O'Fallon, W. M., and Riggs, B. L., 1986. Osteoporosis and the risk of hip fracture. *American Journal of Epidemiology*, 124(2), 254–261. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a114383
- Meng, H. C., and Ludema, K. C., 1995. Wear models and predictive. *Wear*, 181–183, 443–457. DOI: doi:10.1016/0043-1648(95)90158-2
- Meng, Q., Gao, L., Liu, F., Yang, P., Fisher, J., and Jin, Z., 2010. Contact mechanics and elasto-hydrodynamic lubrication in a novel metal-on-metal hip implant with an aspherical bearing surface. *Journal of Biomechanics*, 43(5), 849–857. Elsevier. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2009.11.018

- Mittelmeier, H., and Heisel, J., 1992. Sixteen-Years' Experience With Ceramic Hip Prostheses. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (282), 64–72.
- Mizoue, T., Yamamoto, K., Masaoka, T., Imakiire, A., Akagi, M., and Clarke, I. C., 2003. Validation of acetabular cup wear volume based on direct and two-dimensional measurements: Hip simulator analysis. *Journal of Orthopaedic Science*, 8(4), 491–499. DOI: 10.1007/s00776-003-0674-2
- Moratal, D., 2010. *Finite Element Analysis* (First Edit.). Rijeka: Sciyo.
- Nevelos, J., Ingham, E., Doyle, C., Streicher, R., Nevelos, A., Walter, W., and Fisher, J., 2000. Microseparation of the Centers of Alumina-Alumina Artificial Hip Joints During Simulator Testing Produces Clinically Relevant Wear Rates and Patterns. *The Journal of Arthroplasty*, 15(6), 793–795. DOI: 10.1054/arth.2000.8100
- Niinomi, M., 2010. *Metals for biomedical devices* (First Edit.). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Noori-Dokht, H., Niroomand-Oscuii, H., Jalali-Vahid, D., Jin, Z., Morina, A., Neville, A., and Liskiewicz, T., 2017. Finite element analysis of elastohydrodynamic lubrication in an artificial hip joint under squeeze film motion using fluid-structure interaction method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 231(9), 1171–1183. DOI: 10.1177/1350650117716531
- Ong, K. L., Rundell, S., Liepins, I., Laurent, R., Markel, D., and Kurtz, S. M., 2009. Biomechanical Modeling of Acetabular Component Polyethylene Stresses, Fracture Risk, and Wear Rate following Press-Fit Implantation. *Journal of Orthopaedic Research*, (November), 1467–1472. DOI: 10.1002/jor.20918
- Özkaya, N., Leger, D., Goldsheyder, D., and Nordin, M., 2017. *Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion, and Deformation* (Fourth Edit.). Switzerland: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-44738-4
- Paavolainen, P., and Nevalainen, J. K., 2001. The Finnish Arthroplasty Register Report of the hip register, 72(5), 433–441.
- Palastanga, N., and Soames, R., 2012. *Anatomy and Human Movement: Structure and Function* (Sixth Edit.). Edinburgh: Elsevier.
- Paul, J. P., 1966. Paper 8: Forces Transmitted by Joints in The Human Body. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* (Vol. 181, pp. 8–15). DOI: 10.1243/PIME_CONF_1966_181_201_02
- Paul, J. P., 1976. Force actions transmitted by joints in the human body. *Proceedings of Royal Society of London. Series B, Biological Science*, 192(1107), 163–172.
- Pedersen, D. R., Brown, T. D., Maxian, T. A., and Callaghan, J. J., 1998. Temporal and Spatial Distributions of Directional Counterface Motion at The Acetabular Bearing Surface in Total Hip Arthroplasty. *The Iowa Orthopaedic Journal*, 18, 43–53.

- Pedersen, D. R., Crowninshield, R. D., Brand, R. A., and Johnston, R. C., 1982. An axisymmetric model of acetabular components in total hip arthroplasty. *Journal of Biomechanics*, 15(4), 305–315. DOI: 10.1016/0021-9290(82)90176-2
- Peng, Y., Arauz, P., An, S., and Kwon, Y. M., 2019. Computational modeling of polyethylene wear in total hip arthroplasty using patient-specific kinematics-coupled finite element analysis. *Tribology International*, 129(March 2018), 162–166. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.08.009
- Pivec, R., Johnson, A. J., Mears, S. C., and Mont, M. A., 2012. Hip arthroplasty. *Lancet* 2012, 380, 1768–1777. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)60607-2
- Plank, G. R., Ii, D. M. E., Muratoglu, O. K., Connor, D. O. O., Burroughs, B. R., and Harris, W. H., 2006. Crosslinked Ultra High Molecular Weight Polyethylene Acetabular Liners With Finite Element Analysis and Pressure Sensitive Film. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 80B(1), 1–10. DOI: 10.1002/jbmb
- Popov, V. L., 2017. *Contact mechanics and friction: Physical Principles and Application* (Second Edi.). Germany: Springer. DOI: 10.1016/B978-0-08-052402-3.50015-0
- Pratap, T., and Patra, K., 2018. Mechanical micro-texturing of Ti-6Al-4V surfaces for improved wettability and bio-tribological performances. *Surface and Coatings Technology*, 349(November 2017), 71–81. Elsevier. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.05.056
- Puccio, F. Di, and Mattei, L., 2015. Biotribology of artificial hip joints. *World Journal of Orthopedics*, 6(1), 77–94. DOI: 10.5312/wjo.v6.i1.77
- Qiu, M., Delic, A., and Raeymaekers, B., 2012. The Effect of Texture Shape on the Load-Carrying Capacity. *Tribol Lett*, 48(3), 315–327. DOI: 10.1007/s11249-012-0027-4
- Rahman, H. S. A., Choudhury, D., Osman, N. A. A., Shasmin, H. N., and Abas, W. A. B. W., 2013. In vivo and in vitro outcomes of alumina, zirconia and their composited ceramic-on-ceramic hip joints. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 121(1412), 382–387. DOI: 10.2109/jcersj2.121.382
- Raimondi, M. T., Santambrogio, C., Pietrabissa, R., Raffelini, F., and Molfetta, L., 2001. Improved mathematical model of the wear of the cup articular surface in hip joint prostheses and comparison with retrieved components. *Journal Engineering in Medicine*, 215(4), 377–391. DOI: 10.1243/0954411011535966
- Ranjan, R., Lambeth, D. N., Tromel, M., Goglia, P., and Li, Y., 1991. Laser texturing for low-flying-height media. *Journal of Applied Physics*, 69(8), 5745–5747. DOI: 10.1063/1.347908
- Ravikiran, a., and Jahanmir, S., 2001. Effect of contact pressure and load on wear of alumina. *Wear*, 251(1–12), 980–984. DOI: 10.1016/S0043-1648(01)00739-6

- Reinisch, G., Judmann, K. P., Lhotka, C., Lintner, F., and Zweymüller, K. A., 2003. Retrieval study of uncemented metal-metal hip prostheses revised for early loosening. *Biomaterials*, 24(6), 1081–1091. DOI: 10.1016/S0142-9612(02)00410-6
- Revell, R. A., 2014. *Joint Replacement Technology* (Second Edi.). Cambridge: Woodhead Publishing.
- Reynolds, L. A., and Tansey, E. M., 2007. *Early development of total hip replacement* (First Edit., Vol. 29). London: Wellcome Trust Centre for the History of Medicine at UCL.
- Roaas, A., and Andersson, G. B. J., 1982. Normal Range of Motion of The Hip , Knee and Ankle Joints in Male Subjects , 30-40 Years of Age. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 53(2), 205–208. DOI: 10.3109/17453678208992202
- Rony, L., Sainte, P. De, Steiger, V., Mallet, R., and Hubert, L., 2018. Characterization of wear debris released from alumina-on-alumina hip prostheses : Analysis of retrieved femoral heads and peri-prosthetic tissues. *Micron*, 104(November 2017), 89–94. Elsevier. DOI: 10.1016/j.micron.2017.11.002
- Rose, R. M., Goldfarb, H. V, Ellis, E., and Crugnola, A. M., 1983. On The Pressure Dependence of The Wear of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene. *Wear*, 92(1), 99–111. DOI: 10.1016/0043-1648(83)90010-8
- Rostoker, W., and Galante, J. O., 1979. Contact Pressure Dependence of Wear Rates of Ultra High Molecular Weight Polyethylene. *Journal of Biomedical Materials Research*, 13(6), 957–964. DOI: 10.1002/jbm.820130612
- Roy, T., Choudhury, D., Ghosh, S., Mamat, A. Bin, and Pinguang-Murphy, B., 2015. Improved friction and wear performance of micro dimpled ceramic-on-ceramic interface for hip joint arthroplasty. *Ceramics International*, 41(1), 681–690. Elsevier. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.08.123
- Roy, T., Choudhury, D., Bin Mamat, A., and Pinguang-Murphy, B., 2014. Fabrication and characterization of micro-dimple array on Al₂O₃ surfaces by using a micro-tooling. *Ceramics International*, 40(1), 2381–2388. Elsevier. DOI: 10.1016/j.ceramint.2013.08.009
- Ruggiero, A., Merola, M., and Affatato, S., 2018. Finite element simulations of hard-on-soft hip joint prosthesis accounting for dynamic loads calculated from a Musculoskeletal model during walking. *Materials*, 11(4), 1–11. DOI: 10.3390/ma11040574
- Rydell, N. W., 1966. Forces Acting on the Femoral Head-Prosthesis : A Study on Strain Gauge Supplied Prostheses in Living Persons. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 37(sup88), 1–132. DOI: 10.3109/ort.1966.37.suppl-88.01
- Ryk, G., and Etsion, I., 2006. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear*, 261(7–8), 792–796. DOI: 10.1016/j.wear.2006.01.031
- Saad, A. P. B. M., Syahrom, A., Harun, M. N., and Kadir, M. R. A., 2016. *Wear*

- Prediction on Total Ankle Replacement Effect of Design Parameters* (First Edit.). London: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-21723-9
- Sabatini, M., Pastoureau, P., and Ceuninck, F. De, 2004. *Cartilage and Osteoarthritis* (First Edit., Vol. 1). Totowa: Humana Press.
- Santori, F. S., Santori, N., and Piccinato, A., 2004. *Avascular Necrosis of the Femoral Head: Current Trends* (First Edit.). Milan: Springer.
- Sawant, M. S., Jain, N. K., and Palani, I. A., 2018. Influence of dimple and spot-texturing of HSS cutting tool on machining of Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 261(May), 1–11. Elsevier. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.05.032
- Scholes, S. C., Inman, I. A., Unsworth, A., and Jones, E., 2007. Tribological assessment of a flexible carbon-fibre-reinforced poly (ether – ether – ketone) acetabular cup articulating against an alumina femoral head. *Journal of Engineering in Medicine*, 222(3), 273–283. DOI: 10.1243/09544119JEIM334
- Scholes, S. C., Unsworth, A., Hall, R. M., and Scott, R., 2000. The effects of material combination and lubricant on the friction of total hip prostheses. *Wear*, 241, 209–213. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00377-X
- Sekhar, M. C., Rao, G. U. M., Neeharika, V. B., and Satyanarayana, K., 2017. Design and Analysis of Artificial Hip Joint. *International Journal of Engineering and Management Research*, 7(4), 305–312.
- Seral, F., Seral, F., Palanca, D., and Gracia, L., 2000. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Several Internal and External Pelvis. *Journal of Biomechanical Engineering*, 122(5), 516–522. DOI: 10.1115/1.1289995
- Shankar, S., Gowthaman, K., and Uddin, M. S., 2015. Predicting long-term wear performance of hard-on-hard bearing couples: effect of cup orientation. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 54(10), 1541–1552. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/s11517-015-1440-2
- Shankar, S., and Nithyaprakash, R., 2014. Effect of Radial Clearance on Wear and Contact Pressure of Hard-on-Hard Hip Prostheses Using Finite Element Concepts. *Tribology Transactions*, 57(5), 814–820. DOI: 10.1080/10402004.2014.915072
- Shankar, S., Siddarth, R., Uddin, M. S., and Nithyaprakash, R., 2018. Wear prediction of hard carbon coated hard-on-hard hip implants using finite element method. *International Journal of Computer Aided Engineering and Technology*, 10(4), 440. DOI: 10.1504/IJCAET.2018.10012356
- Shimmin, A., Beaulé, P. E., and Campbell, P., 2008. Current Concepts Review: Metal-on-Metal Hip Resurfacing Arthroplasty. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 90(3), 637–654. DOI: 10.2106/JBJS.G.01012
- Sinha, R. K., 2002. *Hip Replacement: Current Trends and Controversies* (First Edit.). New York: Marcel Dekker.
- Sinnett-Jones, P. E., Wharton, J. A., and Wood, R. J. K., 2005. Micro-abrasion – corrosion of a CoCrMo alloy in simulated artificial hip joint

- environments. *Wear*, 259, 898–909. DOI: 10.1016/j.wear.2005.02.045
- Siopack, J. S., and Jergsen, H. E., 1995. Total Hip Arthroplasty. *Western Journal of Medicine*, 162(3), 243–249.
- Smet, K. De, Campbell, P., and Straeten, C. Van Der, 2013. *The Hip Resurfacing Handbook. The Hip Resurfacing Handbook* (First Edit.). Philadelphia: Woodhead Publishing. DOI: 10.1533/9780857096203.1.69
- Smidt, G. L., 1971. Hip Motion and Related Factors in Walking. *Physical Therapy*, 51(1), 9–21. DOI: 10.1093/ptj/51.1.9
- Stachowiak, G. W., and Batchelor, A. W., 2014. *Engineering Tribology* (Fourth Edi.). Oxford: Elsevier.
- Stansfield, B. W., Nicol, A. C., Paul, J. P., Kelly, I. G., Graichen, F., and Bergmann, G., 2003. Direct comparison of calculated hip joint contact forces with those measured using instrumented implants . An evaluation of a three-dimensional mathematical model of the lower limb. *Journal Biomechanics*, 36, 929–936. DOI: 10.1016/S0021-9290(03)00072-1
- Stevens, J. A., and Olson, S., 2000. Reducing Falls and Resulting Hip Fractures among Older Women. *Home Care Provider*, 134–139. DOI: 10.1067/mhc.2000.109232
- Sutherland, D. H., Olshen, R., Cooper, L., and Woo, S. L. Y., 1980. The Development of Mature Gait. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 62-A(3), 336–337.
- Tronzo, R., 1987. *Surgery of the Hip Joint. Surgery of the Hip Joint* (First Edit., Vol. 1I). Florida: Springer. DOI: 10.1007/978-1-4612-5224-5
- Uddin, M. S., and Zhang, L. C., 2013. Predicting the wear of hard-on-hard hip joint prostheses. *Wear*, 301, 192–200. Elsevier. DOI: 10.1016/j.wear.2013.01.009
- Udofia, I. J., Yew, A., and Jin, Z. M., 2004. Contact mechanics analysis of metal-on-metal hip resurfacing prostheses. *Journal of Engineering in Medicine*, 218(5), 293–305. DOI: 10.1243/0954411041932854
- Unsworth, A., 2006. Tribology of artificial hip joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 220, 711–718. DOI: 10.1243/13506501JET84
- Vasu, R., Carter, D. R., and Harris, W. H., 1982. Stress distributions in the acetabular region-I. before and after total joint replacement. *Journal of Biomechanics*, 15(3), 155–164. DOI: 10.1016/0021-9290(82)90247-0/
- Verdonschot, N., Vena, P., Stolk, J., and Huiskes, R., 2002. Effects of Metal-Inlay Thickness in Polyethylene Cups With Metal-on-Metal Bearings. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, (404), 353–361. DOI: 10.1097/01.blo.0000026569.55792.61
- Wang, L., Williams, S., Udofia, I., Isaac, G., Fisher, J., and Jin, Z., 2012. The effect of cup orientation and coverage on contact mechanics and range of motion of metal-on-metal hip resurfacing arthroplasty. *Journal*

- Engineering in Medicine*, 226(11), 877–886. DOI: 10.1177/0954411912456926
- Wang, W., He, Y., Li, Y., Wei, B., Hu, Y., and Luo, J., 2018. Investigation on inner flow field characteristics of groove textures in fully lubricated thrust bearings. *Industrial Lubrication and Tribology*, 70(4), 754–763. DOI: 10.1108/ILT-08-2017-0224
- Wei, X., Li, W., Liang, B., Li, B., Zhang, J., Zhang, L., and Wang, Z., 2016. Surface modification of Co-Cr-Mo implant alloy by laser interference lithography. *Tribology International*, 97, 212–217. Elsevier. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.01.039
- Weisse, B., Affolter, C., Terrasi, G. P., Piskoty, G., and Köbel, S., 2009. Failure analysis of in vivo fractured ceramic femoral heads. *Engineering Failure Analysis*, 16(4), 1188–1194. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.07.015
- Wilkinson, J. M., Peel, N. F., Elson, R. a, Stockley, I., and Eastell, R., 2001. Measuring bone mineral density of the pelvis and proximal femur after total hip arthroplasty. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 83(2), 283–288. DOI: 10.1302/0301-620X.83B2.10562
- Wroblewski, B. M., 1990. *Revision surgery in total hip arthroplasty* (First Edit.). London: Springer-Verlag. Retrieved from pm:7127965
- Wu, G., Baraldo, M., and Furlanut, M., 1995. Calculationg Percentage Prediction Error: A User's Note. *Pharmacological Research*, 32(4), 241–248. DOI: 10.1016/S1043-6618(05)80029-5
- Yan, Y., Neville, A., and Dowson, D., 2006. Biotribocorrosion — an appraisal of the time dependence of wear and corrosion interactions : I . The role of corrosion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39, 3200–3205. DOI: 10.1088/0022-3727/39/15/S10
- Yu, A., Niu, W., Hong, X., He, Y., Wu, M., Chen, Q., and Ding, M., 2018. Influence of tribo-magnetization on wear debris trapping processes of textured dimples. *Tribology International*, 121(January), 84–93. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.01.046
- Yu, H., Wang, X., and Zhou, F., 2010. Geometric shape effects of surface texture on the generation of hydrodynamic pressure between conformal contacting surfaces. *Tribology Letters*, 37(2), 123–130. DOI: 10.1007/s11249-009-9497-4
- Yushan, L., Yueming, L., Jun, W., and Hongpeng, L., 2016. Tribological performance of dimpled thrust bearings with phyllotactic patterns. *Wear*, 346–347, 108–115. Elsevier. DOI: 10.1016/j.wear.2015.11.008
- Zhang, H., Liu, Y., Hua, M., ya Zhang, D., guo Qin, L., and neng Dong, G., 2018. An optimization research on the coverage of micro-textures arranged on bearing sliders. *Tribology International*, 128(July), 231–239. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.triboint.2018.07.033
- Zhang, Y. L., Zhang, X. G., and Matsoukas, G., 2015. Numerical study of

surface texturing for improving tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene. *Biosurface and Biotribology*, 1(4), 270–277. Elsevier. DOI: 10.1016/j.bsbt.2015.11.003