

TESIS

**ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP
FATIGUE LIFE PADA PERANCAH MAGNESIUM
BERPORI DIBAWAH PERENDAMAN DINAMIS**



RISKY UTAMA PUTRA

03032622024003

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2021**

TESIS

**ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP
FATIGUE LIFE PADA PERANCAH MAGNESIUM
BERPORI DIBAWAH PERENDAMAN DINAMIS**

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Mendapatkan
Gelar Magister Teknik Pada Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Magister Teknik**



RISKY UTAMA PUTRA
03032622024003

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2021**

RINGKASAN

ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP *FATIGUE LIFE* PADA PERANCAH MAGNESIUM BERPORI DIBAWAH PERENDAMAN DINAMIS

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, Juni 2021

Risky Utama Putra Dibimbing Oleh Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri.

The Effect of Morphology on Fatigue life of Porous Magnesium Scaffold Under Dynamic Immersion Test.

xxv + 71 halaman, 3 tabel, 33 gambar

RINGKASAN

Sebuah biomaterial implan yang digunakan dalam proses operasi bedah di bidang ortopedik yang bertujuan untuk merekayasa jaringan tulang yaitu perancah tulang berbahan magnesium. Pada saat ini perancah tulang berbasis magnesium dianggap sebagai pengobatan yang tepat untuk tulang kanselus karena dapat terdegradasi seiring tersusunnya jaringan tulang baru. Karakterisasi morfologi berdasarkan pengujian degradasi dinamik adalah salah satu parameter penting yang dapat mempengaruhi *fatigue life* pada magnesium berpori. Kerusakan pada tulang kanselus mengakibatkan rusaknya seluruh jaringan pada tulang dikarenakan beban berulang yang terjadi pada perancah tulang. Dengan menerapkan kondisi batas pada studi mekanika padat dan *fatigue* simulasi, setiap spesimen diberikan beban strain tulang yang berbeda (0-3500 μ strain) yang menciptakan variasi displacement pada perancah tulang. Dalam penelitian ini penulis mengkaji *fatigue life* perancah tulang pada saat implan berada didalam jaringan hidup, dimana mengkorelasikan antara morfologi implan perancah Mg berpori terhadap *fatigue life*. Ketika implan ditanamkan pada tulang, morfologi perancah dapat dipantau oleh dokter ortopedik dengan pemindaian micro-CT dan umur ketahanan struktur perancah terkait dengan *fatigue life* dapat diprediksi. Hasil yang didapat pada penelitian ini yaitu hasil *fatigue life* yang menunjukkan bahwa magnesium berpori dipengaruhi oleh besarnya pembebanan yang diberikan, morfologi, dan tingkat degradasi. Semakin besar beban yang diberikan dan lamanya waktu perendaman dinamis akan mengurangi *fatigue life* magnesium berpori.

Kata kunci: Mekanika *padat*, *fatigue life*, perancah tulang, biodegradasi, Magnesium

SUMMARY

The Effect of Morphology on *Fatigue life* of Porous Magnesium Scaffold Under Dynamic Immersion Test

Scientific papers in the form of a thesis, Juni 2021

Risky Utama Putra; Supervised by Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri..

Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap *Fatigue life* pada Perancah Magnesium Berpori dibawah Perendaman Dinamis.

xxv + 71 pages, 3 table, 33 pictures

SUMMARY

An implantable biomaterial used in orthopedic surgical operations that aims to engineer bone tissue, namely a magnesium-based bone scaffold. At present, magnesium-based bone scaffolding is considered to be an appropriate treatment for cancellous bone as it degrades as new bone tissue is formed. Morphological characterization based on dynamic degradation testing is one of the important parameters that can affect *fatigue life* in porous magnesium. Damage to the cancellous bone results in the destruction of all the tissue in the bone due to Repetitive Loads on the bone scaffold. By applying boundary conditions to the study of Solid mechanics and fatigue simulation, each specimen was subjected to a different bone strain load (0-3500 μ strain) which created a variation in displacement in the bone scaffold. In this study author examined the *fatigue life* of bone scaffolding when the implant was in living tissue, which correlated the morphology of porous Mg scaffold implants to *fatigue life*. When the implant is implanted in the bone, the morphology of the scaffold can be monitored by an orthopedic doctor with a micro-CT scan and the endurance life of the scaffold structure related to *fatigue life* can be predicted. The results obtained in this study are the results of *fatigue life* which indicate that porous magnesium is influenced by the amount of load applied, morphology, and the level of degradation. The greater the load applied and the length of dynamic immersion time will reduce the *fatigue life* of porous magnesium..

Keyword : Solid mechanics, *fatigue life*, Bone Scaffolding, Biodegradation, Magnesium

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Pertama, penulis mengucapkan syukur dan berterima kasih kepada Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat, karunia, dan anugerah-Nya sehingga tesis ini dapat diselesaikan. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga akhirnya penulis dapat menyelesaikan Tesis ini, adapun pihak tersebut:

1. Kepada orang tua penulis yaitu Ayah saya Ir. Herik Henci Agrisa M.T dan Ibu Saya Dewi Armalia dan Adik saya Maharani Salsa Agrisa dan keluarga besar yang selalu memberikan dukungan moral dan materi serta doanya yang tulus membimbing, mengarahkan ,mendidik dan memotivasi penulis dari awal hingga selesainya tesis ini.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri Selaku Dosen Pembimbing Tesis I dan Bapak. Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Prodi Magister S2 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya sekaligus Dosen Pembimbing Tesis II yang dimana semuanya dengan ikhlas dan tulus telah membimbing, mengarahkan, mendidik, ,memotivasi serta banyak memberikan sarana kepada penulis dari awal hingga selesainya tesis ini ini.
3. Bapak Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D dan Bapak Dr, Ir, Hendri Chandra, MT serta Bapak Dipl.-Ing. Ir. Amrifan Saladin Mohruni, Ph.D. selaku Tim Penguji Tesis S2 Magister Teknik Mesin di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya yang juga memberikan bimbingan serta arahan dalam ruang lingkup Jurusan Teknik Mesin.
4. Pak Agung Kristian selaku Staf Administrasi Prodi S2 Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah banyak membantu dalam proses administrasi.
5. Rekan-rekan magister jurusan teknik mesin universitas sriwijaya dan rekan sesama peneliti yang telah membantu saya dalam menjalankan penelitian,

membuat tesis sehingga bersama-sama Kami diberbagai kondisi suka dan duka.

Dalam penulisan tesis ini, penulis sadar masih terdapat kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran serta masukan yang bersifat membangun sangat penulis harapkan untuk membantu dalam perbaikan. Penulis juga mengharapkan tesis dengan judul “ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP *FATIGUE LIFE* PADA PERANCAH MAGNESIUM BERPORI DIBAWAH PERENDAMAN DINAMIS” dapat memberikan manfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di negara Indonesia serta menjadi referensi bagi yang akan mengkaji dimasa yang akan datang.

Wassalamualaikum Warahmatullah Wabarakatuh

Palembang, Juni 2021

Penulis

DAFTAR ISI

TESIS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERSETUJUAN	vii
HALAMAN PENGESAHAN AGENDA	ix
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	xi
RINGKASAN	xv
SUMMARY	xvii
KATA PENGANTAR.....	xix
DAFTAR ISI	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR TABEL	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
1.5.1 Manfaat Teoritis.....	5
1.5.2 Manfaat Praktis	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Studi Literatur	7
2.2 Definisi dan Bagian dari Struktur Tulang.....	8
2.2 Tulang Kortikal.....	9
2.3 Tulang Kanelus	10
2.4 Arsitektur Tulang Cancellous	11
2.5 Rekayasa Jaringan Perancah Tulang	12
2.5.1 Material Pada Perancah Tulang	14
2.5.2 Porositas Bone Scaffold	16
2.5.3 Mikroarsitektur.....	17
2.6 Pengujian Dynamic Immersion Test	17
2.6.1 Tingkat Degradasi Magnesium Berpori	18
2.7 Perilaku Degradasi Magnesium Berpori.....	19
2.8 Citra Gambar Micro Computed Tomography (μ CT) Scanner	22
2.9 Syarat Perancangan Perancah Tulang Magnesium	23
2.10 Penerapan Metode Elemen Hingga pada Rekayasa Jaringan	24

2.11 Fatigue.....	27
2.11.1 Fatigue Strength Curves	31
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	35
3.1 Design Penelitian	35
3.2 Variable Penelitian dan Defini Operasional	35
3.2.1 Variable Penelitian	35
3.2.2 Design Operasional	36
3.3 Diagram Alir Penelitian	37
3.4 Pengumpulan Data	38
3.5 Pemodelan.....	38
3.5.1 Pemodelan 3D Perancah tulang sebelum terdegradasi.....	38
3.5.2 Geometri Perancah Tulang.....	39
3.5.2 Pemodelan 3D Perancah tulang sesudah terdegradasi	40
3.6 Pengantar Comsol	44
3.6.1 Parameter Material dan Fatigue Magnesium	44
3.6.2 Profil Pembebanan	45
3.7 Meshing dan solver model	46
3.8 Konevergen Studi.....	47
3.9 Solver Model.....	48
3.10 Studi Morfologi Implan Magnesium Bone Scaffold	48
3.11 Hasil yang diharapkan.....	49
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	51
4.1 Distribusi Stress pada Bonescaffold	51
4.2 Fatigue Magnesium Berpori	53
4.3 Hasil Simulasi Studi Fatigue.....	56
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	61
5.1 Kesimpulan	61
5.2 Saran	61
DAFTAR PUSTAKA.....	63

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 State of the Art penelitian (SOTA).....	7
Gambar 2.2 Struktur Bagian Tulang (pbroks13, 2008).....	8
Gambar 2.3 Struktur Tulang (Nguyen et al., 2012).....	9
Gambar 2.4 Bagian Tulang Kancellus dan Kortikal.....	11
Gambar 2.5 Perancah Tulang Magnesium	15
Gambar 2.6 (a) Skematik dari test rig dynamic immersion test. (b) Gambaran fluida melintasi sampel di dalam chamber pengujian. (Md Saad et al., 2016)	18
Gambar 2.7 Morphology comparison of the specimens after the dynamic immersion tests before and after cleaning. (Md saaad 2016)	19
Gambar 2.8 Skematik proses metode μ CT scanning.	23
Gambar 2.9 Elemen satu dimensi (Susatio, 2004)	26
Gambar 2.10 Elemen dua dimensi (Susatio, 2004).....	26
Gambar 2.11 elemen tiga dimensi tetrahedral dan berbentuk balok (Susatio, 2004)	26
Gambar 2.12 Fatigue strength pada siklus 107 biomedical stainless steel, Co alloy, titanium and alloynya, dan tulang (Niinomi, 2007)	28
Gambar 2.13 Urutan deformasi siklik dan kerusakan akibat lelah.....	29
Gambar 2.14 Kurva S-N dan skema fatigue limits	31
Gambar 2.15 Kurva Strain life	33
Gambar 3.1 Diagram alir penelitan	37
Gambar 3.2 Pemodelan 3D bone scaffold sebelum terdegradasi menggunakan SolidWorks (a) Sampel A 3x1 (b) Sampel B 3x2 (c) Sampel C (4x2).	39
Gambar 3.3 μ CT scanner Sky Scan 1172 High Resolution	40
Gambar 3.4 Analogi proses pengambilan citra gambar pada implan perancah tulang dengan μ CT scanner	41
Gambar 3.5 2D penampang specimen dari hasil gambar yang diambil dari μ CT scanner setelah degradasi	41
Gambar 3.6 Proses Thresholding pada perangkat lunak Mimics berbasis (min-max) dimana mengalgoritma data sehingga hasil modelnya sesuai dengan aktual.....	42
Gambar 3.7 Analogi rekonstruksi model 3D pada implan bone scaffold	42
Gambar 3.8 Model 3D perancah setelah terdegradasi yang telah di rekonstruksi menggunakan perangkat lunak Mimics, ImageJ, Amira dan SolidWorks.....	43
Gambar 3.9 Profil pembebanan perancah tulang	46
Gambar 3.10 Contoh meshing pada pemodelan 3D.....	47

Gambar 3.11 Grafik convergance study sebelum dan sesudah degradasi	48
Gambar 4.1 Perbandingan plot lontur distribusi stress pada perancah magnesium berpori pada waktu perendaman dinamis 0, 24, 48, dan 72 jam dengan beban 1000 $\mu\epsilon$	52
Gambar 4.2 Perbandingan plot kontur distribusi stress perancah magnesium berpori pada waktu perendaman 48 jam dengan variasi beban 0-3500 $\mu\epsilon$	53
Gambar 4.3 Plot kontour life time implan magnesium berpori pada waktu perendaman dinamis 0, 24, 48, dan 72 jam dengan beban 1000 $\mu\epsilon$	54
Gambar 4.4 Plot kontour life time implan magnesium berpori pada sampel B dengan waktu perendaman 48 jam dengan variasi beban 0-3500 $\mu\epsilon$	55
Gambar 4.5 Cycles of failure (Nf) vs Load ($\mu\epsilon$)	57
Gambar 4.6 Hubungan antar fatigue life dan morfologi magnesium berpori (a) BV/TV, (b) Surface area, dan (c) Tb.Sp.	58

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Geometri perancah tulang	39
Tabel 3.2 Parameter yang digunakan pada pemodelan kelelahan dari perancah tulang berpori	45
Tabel 3.3 Profil pembebanan perancah tulang	46

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI
TERHADAP *FATIGUE LIFE* PADA PERANCAH
MAGNESIUM BERPORI DIBAWAH
PERENDAMAN DINAMIS**

TESIS

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

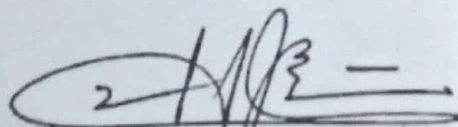
Oleh:

RISKY UTAMA PUTRA

NIM. 03032622024003

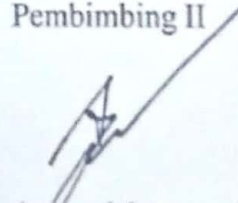
Palembang, Juni 2021

Menyetujui
Pembimbing I

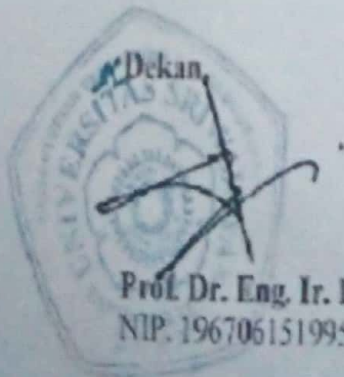


Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri
NIP. 195802011984031002

Pembimbing II

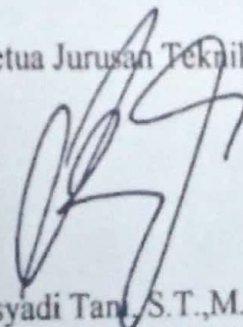


Agung Mataram ST. MT. Ph.D
NIP. 197901052003121002



Prof. Dr. Eng. Ir. H. Joni Arliansyah, M.T
NIP. 196706151995121002

Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

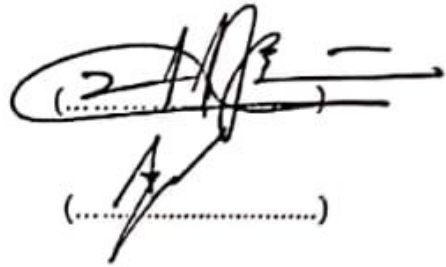
HALAMAN PERSETUJUAN

Tesis dengan judul "ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP *FATIGUE LIFE* PADA PERANCAH MAGNESIUM BERPORI DIBAWAH PERENDAMAN DINAMIS" telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Tesis Fakultas Teknik/Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya pada Tanggal 27 Maret 2021 dan dinyatakan sah untuk melakukan penelitian lebih lanjut.

Palembang, 27 Juni 2021

Pembimbing:

1. Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri
NIP. 195802011984031002
2. Agung Mataram ST. MT. Ph.D
NIP. 197901052003121002



(.....)

(.....)

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Berupa Tesis:

1. Irsyadi Yani, ST ,M.Eng, PhD
NIP. 197112251997021001
2. Dr. Ir. Hendri Chandra, MT
NIP. 196004071990031003
3. Dipl.-Ing. Ir. Amrifan Saladin Mohruni, Ph.D
NIP. 196409111999031002



(.....)

(.....)

(.....)



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No. :
Diterima Tanggal :
Paraf :

TESIS

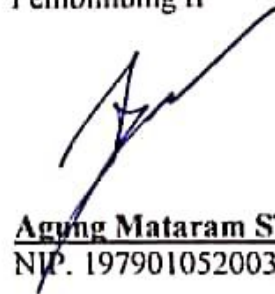
NAMA : Risky Utama Putra
NIM : 03032622024003
JURUSAN : Teknik Mesin
BIDANG STUDI : Konstruksi
JUDUL SKRIPSI : Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap *Fatigue life* Pada Perancah Magnesium Berpori Dibawah Perendaman Dinamis
DIBUAT TANGGAL : Januari 2021
SELESAI TANGGAL : Juni 2021

Palembang, Juni 2021


Menyetujui
Pembimbing I

Pembimbing II


Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri
NIP. 19580201984031002


Agung Mataram ST. MT. Ph.D
NIP. 197901052003121002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin


Irsyadyani, S.T. M.Eng., Ph.D.
NIP. 197112251997021001

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Risky Utama Putra

NIM : 03032622024003

Judul : Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap *Fatigue life* Pada Perancah Magnesium Berpori Dibawah Perendaman Dinamis.

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, Juni 2021

Penulis,



RISKY UTAMA PUTRA

NIM. 03032622024003

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Risky Utama Putra

NIM : 03032622024003

Judul : Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap *Fatigue life* Pada Perancah Magnesium Berpori Dibawah Perendaman Dinamis

Menyatakan bahwa Skripsi saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim 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, Juni 2021



[Risky Utama Putra]

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perancah tulang merupakan material berpori yang bertujuan untuk mendukung proses penyembuhan serta pembentukan tulang baru. Perancah tulang juga berfungsi sebagai dukungan struktural pada tulang yang rusak, sehingga orang tersebut tidak perlu melakukan *bedrest* dan dapat beraktifitas sampai jaringan tulang dapat tumbuh seperti semula (Polo-Corrales et al., 2014).

Material perancah tulang seperti Magnesium merupakan kandidat biomaterial implan tulang karena memiliki sifat mekanik yang hampir sama dengan tulang manusia dan sebagai penahan beban yang baik (*load bearing*), dan juga mempunyai efek stimulator yang baik pada pertumbuhan tulang (Bigi et al., 1993). Magnesium ini merupakan pendukung metabolisme tubuh manusia dan bebas dari racun, magnesium merupakan kation yang paling berlimpah keempat (Bose et al., 2012).

Dalam implementasinya, perancah saat ditanamkan kedalam tubuh manusia akan langsung bersentuhan dengan tulang kanselus dan secara biomekanik akan menyesuaikan diri dengan beban mekanis dari gerakan secara repetitive (*cyclic*) pada aktivitas fisiologi manusia. Dari aktivitas fisiologi tersebut yang meliputi siklus beban mekanis secara terus menerus dimana tulang mengalami regangan antara 1000-3500 $\mu\epsilon$. Perancah magnesium sebagai bantalan beban harus bertahan dari beban mekanis yang diterima dari gerakan secara siklik pada aktifitas fisiologi tulang. Namun pada saat yang sama material akan mengalami pelemahan yang disebabkan oleh beban yang berulang ulang sehingga terjadi kerusakan pada struktur. Fenomena ini dinamakan kegagalan fatigue. *Fatigue failure* telah teridentifikasi sebagai masalah utama yang terkait dengan pelonggaran implan (*implant loosening*), *stress shielding*, sehingga menyebabkan kegagalan implan.

Fenomena degradasi pada perancah magnesium menyebabkan struktur perancah akan kehilangan kekuatannya (*mechanical strength*) seiring dengan waktu yang akan mempengaruhi *fatigue properties/strength*. Perancah akan kehilangan kekuatannya seiring dengan waktu dan ditambah dengan beban mekanis (*mechanical response*) yang diterima perancah dari gerakan siklus pada aktifitas fisiologi tulang. Hal ini sangat sulit untuk memprediksi umur perancah dan sewaktu waktu perancah akan gagal dikarenakan fenomena degradasi yang menyebabkan *struts* perancah berkurang serta beban fatigue yang diterima ditambah dengan posisi implant berada pada tubuh manusia.

Morfologi pada sampel implan *bone scaffold* terdapat parameter yang memainkan peranan penting dalam sifat mekanis biodegradasi pada implan *bone scaffold* yaitu BV/TV, Tb.Sp dan surface area. Ada banyak literatur yang melaporkan parameter indeks morfologi tulang trabecular mempunyai korelasi dengan perilaku mekanisnya (Rincón-Kohli and Zysset, 2009). Perubahan morfologi struktur perancah Mg berpori terhadap perilaku struktur mekanis dan *fatigue life* akibat fenomena degradasi didalam jaringan tulang hanya dapat diverifikasi melalui kombinasi antara pendekatan pemindaian micro-CT dan analisis komputasi elemen hingga

Dalam studi sebelumnya peneliti telah melakukan experimental implant material zinc dan iron. (Hedayati et al., 2018; Li et al., 2020, 2019; Senatov et al., 2016) Namun untuk mengkaji perilaku fatigue degradation Mg berpori sebelum dan setelah degradasi sangat rumit serta hampir tidak mungkin dilakukan saat implan ditanamkan didalam tulang dengan pengujian secara eksperimental. Oleh karena itu, studi hubungan antara morfologi dan fatigue sangat penting dikaji dalam penelitian ini. *fatigue properties/fatigue life* perancah Mg berpori dapat diantisipasi melalui pendekatan metode pemindaian micro-CT, dimana perubahan morfologinya dapat dianalisis sebagai fungsi dari *fatigue life* pada struktur perancah. *fatigue life* pada struktur perancah sangat ditentukan oleh perilaku degradasinya terutama saat tulang dalam proses penyembuhan. Dengan mengetahui perubahan morfologi maka laju degradasi dan perilaku mekanis serta *fatigue life* perancah tulang ketika ditanam di jaringan tulang dapat diprediksi dan dikontrol. Dalam penelitian ini penulis melakukan

simulasi menggunakan perangkat lunak *COMSOL Multiphysics 5.4* dengan metode *solid mechanics* dan *Fatigue simulation*. Hasilnya diharapkan dapat memberikan hasil yang presisi dan akurat dalam menentukan nilai siklus Fatigue pada implan magnesium berpori.

Dalam penelitian ini kami mengkaji *fatigue life* perancah tulang pada saat implan berada didalam jaringan hidup, dimana mengkorelasikan antara morfologi implan perancah Mg berpori terhadap *fatigue life*. Ketika implan ditanamkan pada tulang, morfologi perancah dapat dipantau oleh dokter ortopedik dengan pemindaian micro-CT dan umur ketahanan struktur perancah terkait dengan *fatigue life* dapat diprediksi. Atas dasar tersebut penulis termotivasi untuk melakukan penelitian tentang Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap *Fatigue life* Pada Perancah Magnesium Berpori Dibawah Perendaman Dinamis. Pendekatan simulasi ini juga memiliki beberapa kelebihan seperti dapat menghematnya waktu dan biaya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan diatas, inti permasalahan yang diambil dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perubahan perilaku mekanik dan visualisasi proses dinamik degradasi yang terjadi pada variasi model scaffold magnesium berpori?
2. Bagaimana pengaruh morfologi setelah implant dilakukan pengujian perendaman dinamis terhadap *fatigue life scaffold* dengan Metode Elemen hingga ?

1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam tesis ini tidak jauh dari penelitian yang dilakukan sehingga lebih terarah dan terfokus, untuk itu disusunlah suatu batasan masalah dalam penulisannya yaitu :

1. Material yang digunakan perancah tulang yaitu magnesium
2. Pemodelan perancah tulang sebelum degradasi menggunakan perangkat lunak SolidWork.
3. Pendekatan simulasi berdasarkan variasi waktu degradasi dan tingkat *displacement* menyerupai kondisi aktivitas fisiologis manusia menggunakan metode *solid mechanic* dan *fatigue simulation*.
4. Nilai geometri, sifat material dan proses pengujian dynamic degradasi data diperoleh dari penelitian yang dilakukan (Md Saad et al., 2016).
5. Hasil simulasi *solid mechanic* berupa analisa plot kontur distribusi stress pada 3 sampel morfologi terhadap masing - masing 4 variasi waktu.
6. Simulasi menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics 5.4

1.4 Tujuan Penelitian

Menganalisis pengaruh Pembebanan dan Morfologi pada perancah tulang berdasarkan eksperimental Dynamic immersion test menggunakan Metode Elemen Hingga serta pengaruhnya terhadap *Fatigue life* pada Perancah Magnesium Berpori.

1.5 Manfaat Penelitian

1.5.1 Manfaat Teoritis

Studi ini sangat penting untuk mengkaji *fatigue life* perancah tulang saat berada didalam jaringan hidup, dimana mengkorelasikan antara morfologi terhadap cyclic failure (*number of cycle*) implan perancah Mg berpori dan hubungan antara perilaku degradasi dinamik terhadap *fatigue life*, yang dimana untuk selanjutnya dapat dijadikan acuan dalam penelitian selanjutnya.

1.5.2 Manfaat Praktis

Fatigue life perancah Mg berpori saat terjadi fenomena degradasi secara in-vivo ketika implan ditanamkan pada tubuh pasien dapat ditentukan menggunakan kombinasi metode pemindaian μ CT dan simulasi elemen hingga. Dari data gambar pemindaian μ CT, parameter seperti struktur morfologi material setelah terdegradasi dianalisis masing-masing menggunakan pemindaian μ CT dan grafik fatigue failure dapat diperoleh dengan simulasi elemen hingga. Dengan metode ini, laju degradasi dan jaringan tulang baru yang tumbuh dalam masa penyembuhan dapat dimonitor secara ketat. Sebagai tambahan, saat proses penyembuhan tulang terjadi dalam kondisi yang sangat baik, maka kegagalan perancah tulang dapat diminimalisir sehingga pasien tidak lagi membutuhkan operasi kedua. Ini dapat mengurangi biaya yang harus dikeluarkan oleh pasien dan penggunaan perancah tulang menyebabkan pasien dapat terus melakukan aktivitas yang diinginkan, sehingga mengurangi waktu pasien mendapatkan perawatan dan berkontribusi pada hidup yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ami R. Amini, Laurencin, C.T., Nukavarapu, S.P., 2013. Bone Tissue Engineering: Recent Advances and Challenges. 40 (5): 363–408.
- Ashman, R.B., Corint, J.D., Turnerj, C.H., 1987. Elastic Properties of Cancellous Bone : M (10).
- Basan, R., Franulović, M., Prebil, I., Črnjarić-Žic, N., 2011. Analysis of strain-life fatigue parameters and behaviour of different groups of metallic materials. *International Journal of Fatigue*, 33 (3): 484–491.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.10.005>
- Basri, H., Syahrom, A., Adibah, R., Mohd, M.S., n.d. The Effect of Degradation Time Variation on Porous Magnesium Implant Bone Scaffold with Constant SBF Flow Rate.
- Basri, H., Syahrom, A., Saad, A.P.M., Rabiatal, A.A., Akbar Teguh, P., Diansyah, A., Putra, R.U., 2018. The Effect of Morphology on the Biodegradation Behavior of Porous Magnesium Bone Scaffold. *E3S Web of Conferences*, 68 1–9. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186801020>
- Bauer, T.W., 1999. The pathology of total joint arthroplasty II . Mechanisms of implant failure 483–497.
- Bigi, A., Falini, G., Foresti, E., Ripamonti, A., Gazzano, M., Roveri, N., 1993. Magnesium influence on hydroxyapatite crystallization. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 49 (1): 69–78. [https://doi.org/10.1016/0162-0134\(93\)80049-F](https://doi.org/10.1016/0162-0134(93)80049-F)
- Bose, S., Roy, M., Bandyopadhyay, A., 2012. Recent advances in bone tissue engineering scaffolds. *Trends in Biotechnology*, 30 (10): 546–554.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.07.005>
- Buckwalter, J.A., Cooper, R.R., 1987. Bone structure and function. *Instructional course lectures*, 36 27–48.
- Chen, Y., Schellekens, M., Zhou, S., Cadman, J., Li, W., Appleyard, R., Li, Q., 2011. Design Optimization of Scaffold Microstructures Using Wall Shear Stress Criterion Towards Regulated Flow-Induced Erosion. *Journal of Biomechanical Engineering*, 133 (8): 81008.

- <https://doi.org/10.1115/1.4004918>
- Dendorfer, S., Maier, H.J., Taylor, D., Hammer, J., 2008. Anisotropy of the fatigue behaviour of cancellous bone. 41 636–641.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.09.037>
- Ebara, R., 2010. Corrosion fatigue crack initiation behavior of stainless steels. *Procedia Engineering*, 2 (1): 1297–1306.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.03.141>
- Fajdiga, G., Sraml, M., 2009. Fatigue crack initiation and propagation under cyclic contact loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 76 (9): 1320–1335. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.02.005>
- Gagg, C.R., Lewis, P.R., 2009. In-service fatigue failure of engineered products and structures - Case study review. *Engineering Failure Analysis*, 16 (6): 1775–1793.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.008>
- Garcia, D., Zysset, P.K., Charlebois, M., Curnier, A., 2009. A three-dimensional elastic plastic damage constitutive law for bone tissue 149–165. <https://doi.org/10.1007/s10237-008-0125-2>
- González-velázquez, J.L., 2019. Mechanical Behavior and Fracture of Engineering Materials.
- Griza, S., Reis, M., Reboh, Y., Reguly, A., Strohaecker, T.R., 2008. Failure analysis of uncemented total hip stem due to microstructure and neck stress riser. *Engineering Failure Analysis*, 15 (7): 981–988.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.10.012>
- Gu, X.N., Zhou, W.R., Zheng, Y.F., Liu, Y., Li, Y.X., 2010. Degradation and cytotoxicity of lotus-type porous pure magnesium as potential tissue engineering scaffold material. *Materials Letters*, 64 (17): 1871–1874.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.06.015>
- Haddock, S.M., Yeh, O.C., Mummaneni, P. V, Rosenberg, W.S., Keaveny, T.M., 2004. Similarity in the fatigue behavior of trabecular bone across site and species. 37 181–187. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(03\)00245-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(03)00245-8)
- Hedayati, R., Ahmadi, S.M., Lietaert, K., Tümer, N., Li, Y., Amin Yavari, S.,

- Zadpoor, A.A., 2018. Fatigue and quasi-static mechanical behavior of bio-degradable porous biomaterials based on magnesium alloys. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 106 (7): 1798–1811.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.36380>
- Hollister, S.J., 2009. Scaffold design and manufacturing: From concept to clinic. *Advanced Materials*, 21 (32–33): 3330–3342.
<https://doi.org/10.1002/adma.200802977>
- Hollister, S.J., 2005. Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials*, 4 (7): 518–524. <https://doi.org/10.1038/nmat1421>
- Hollister, S.J., Maddox, R.D., Taboas, J.M., 2002. Optimal design and fabrication of scaffolds to mimic tissue properties and satisfy biological constraints. *Biomaterials*, 23 (20): 4095–4103.
[https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00148-5](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00148-5)
- Infometrik, 2009. Konsep Dasar Finite Element Method [WWW Document]. *Informasi Mekanika, Material, dan Manufaktur*.
- j.n.reddy, 1988. An Introduction to the Finite Element Method, Second Edi. ed, Mathematics of Computation. <https://doi.org/10.2307/2007936>
- Janssen, D., Mann, K.A., Verdonchot, N., 2008. Micro-mechanical modeling of the cement-bone interface: The effect of friction, morphology and material properties on the micromechanical response. *Journal of Biomechanics*, 41 (15): 3158–3163.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2008.08.020>
- Jarrgensen, C.S., Kundu, T., 2002. Measurement of material elastic constants of trabecular bone : a micromechanical analytic study using a 1 GHz acoustic microscope. 20.
- Jasmawati, N., Fatihhi, S.J., Putra, A.M.S., Syahrom, A., Harun, M.N., Öchsner, A., Abdul Kadir, M.R., 2017. Mg-based porous metals as cancellous bone analogous material: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231 (6): 544–556.
<https://doi.org/10.1177/1464420715624449>
- Kamaya, M., Kawakubo, M., 2015. Loading sequence effect on fatigue life of

- Type 316 stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 81 10–20.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.07.009>
- Kane, R., Ma, P.X., 2013. Mimicking the nanostructure of bone matrix to regenerate bone. *Materials Today*, 16 (11): 418–423.
<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.11.001>
- Knychala, J., Bouropoulos, N., Catt, C.J., Katsamenis, O.L., Please, C.P., Sengers, B.G., 2013. Pore geometry regulates early stage human bone marrow cell tissue formation and organisation. *Annals of Biomedical Engineering*, 41 (5): 917–930. <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0748-z>
- Lacroix, D., Planell, J.A., Prendergast, P.J., 2009. Computer-aided design and finite-element modelling of biomaterial scaffolds for bone tissue engineering. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 367 (1895): 1993–2009. <https://doi.org/10.1098/rsta.2009.0024>
- Lambotte, A., 1932. L'utilisation Du Magnesium Comme Materiel Perdu Dans L'osteosynthèse. *Bull Mem Soc Nat Chir*, 28 1325–34.
- Li, Y., Li, W., Bobbert, F.S.L., Lietaert, K., Dong, J.H., Leeflang, M.A., Zhou, J., Zadpoor, A.A., 2020. Corrosion fatigue behavior of additively manufactured biodegradable porous zinc. *Acta Biomaterialia*, 106 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.02.001>
- Li, Y., Lietaert, K., Li, W., Zhang, X.Y., Leeflang, M.A., Zhou, J., Zadpoor, A.A., 2019. Corrosion fatigue behavior of additively manufactured biodegradable porous iron. *Corrosion Science*, 156 (January): 106–116. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.05.003>
- Liebschner, M. a. K., Wettergreen, M. a., 2003. Optimization of Bone Scaffold Engineering for Load Bearing Applications. *Topics in Tissue Engineering* 1–39.
- Liping Xu, Guoning Yu, Erlin Zhang, Feng Pan, K.Y., 2007. In vivo corrosion behavior of Mg-Mn-Zn alloy for bone implant application. *Journal of Biomedical Materials Research, Part A* 83 (3): 703–11.
<https://doi.org/DOI: 10.1002/jbm.a.31273>
- Madhukarf, S., Harshith Reddy, B.R., Kumar, G.A., Naikf, R.P., 2018. A

- Study on Improvement of Fatigue Life of materials by Surface Coatings.
International Journal of Current Engineering and Technology, 8 (1).
<https://doi.org/10.14741/ijcet.v8i01.10878>
- Maguire, M.E., Cowan, J.A., 2002. Magnesium chemistry and biochemistry [Review]. *BioMetals*, 15 (3): 203–210.
- Majumdar, S., Kothari, M., Augat, P., Newitt, D.C., Link, T.M., Lin, J.C., Lang, T., Lu, Y., Genant, H.K., 1998. High-resolution magnetic resonance imaging: Three-dimensional trabecular bone architecture and biomechanical properties. *Bone*, 22 (5): 445–454.
[https://doi.org/10.1016/S8756-3282\(98\)00030-1](https://doi.org/10.1016/S8756-3282(98)00030-1)
- Masaki, K., Ochi, Y., Matsumura, T., 2006. Small crack property of austenitic stainless steel with artificial corrosion pit in long life regime of fatigue. *International Journal of Fatigue*, 28 (11): 1603–1610.
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.06.055>
- Materialise®, 2015. Mimics® Materialise®. *Mimics® Student Edition Course Book* 83. <https://doi.org/http://uc.materialise.com/mimics>
- Md. Saad, A.P., Jasmawati, N., Harun, M.N., Abdul Kadir, M.R., Nur, H., Hermawan, H., Syahrom, A., 2016. Dynamic degradation of porous magnesium under a simulated environment of human cancellous bone. *Corrosion Science* 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.017>
- Md Saad, A.P., Abdul Rahim, R.A., Harun, M.N., Basri, H., Abdullah, J., Abdul Kadir, M.R., Syahrom, A., 2017. The influence of flow rates on the dynamic degradation behaviour of porous magnesium under a simulated environment of human cancellous bone. *Materials and Design*, 122 268–279. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.029>
- Md Saad, A.P., Jasmawati, N., Harun, M.N., Abdul Kadir, M.R., Nur, H., Hermawan, H., Syahrom, A., 2016. Dynamic degradation of porous magnesium under a simulated environment of human cancellous bone. *Corrosion Science*, 112 495–506.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.017>
- Melrose, J., Perroy, R., Careas, S., 2008. DeGarmo's Materials and Process in manufacturing, Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015.

- <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Merrill, T.L., Merrill, D.R., Akers, J.E., Rd, M.H., Parkway, G., Hill, M., 2012. Sbc2012-800. 133 (1): 1–2. <https://doi.org/10.1115/1>
- Metzger, T.A., Kreipke, T.C., Vaughan, T.J., McNamara, L.M., Niebur, G.L., 2015. The In Situ Mechanics of Trabecular Bone Marrow: The Potential for Mechanobiological Response. *Journal of Biomechanical Engineering*, 137 (1): 11006. <https://doi.org/10.1115/1.4028985>
- Moore, T.L.A., Gibson, L.J., 2016. Fatigue Microdamage in Bovine Trabecular Bone. 125 (December 2003): 769–776. <https://doi.org/10.1115/1.1631584>
- Nguyen, L.H., Annabi, N., Nikkhah, M., Bae, H., Binan, L., Park, S., Kang, Y., Yang, Y., Khademhosseini, A., 2012. Vascularized bone tissue engineering: Approaches for potential improvement. *Tissue Engineering - Part B: Reviews*, 18 (5): 363–382. <https://doi.org/10.1089/ten.teb.2012.0012>
- Niinomi, M., 2007. Fatigue characteristics of metallic biomaterials. *International Journal of Fatigue*, 29 (6): 992–1000. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.09.021>
- Niinomi, M., 2002. Recent Metallic Materials for Biomedical Applications. 33 (MARCH).
- Odgaard, A., 1997. Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture. *Bone*, 20 (4): 315–328. [https://doi.org/10.1016/S8756-3282\(97\)00007-0](https://doi.org/10.1016/S8756-3282(97)00007-0)
- Okuma, T., 2001. Magnesium and bone strength. *Nutrition*, 17 (7–8): 679–680. [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(01\)00551-2](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(01)00551-2)
- pbroks13, 2008. Bone cross-section.svg [WWW Document].
- Pertiwi, A., 2018. Studi Efek Dinamik Degradasi Terhadap Degradasi Fatigue Life Pada Biodegradabel Magnesium Berpori Di Bawah Simulasi Lingkungan Tulang Cancellous Dengan Pendekatan Komputasi. Universitas Airlangga.
- Polo-Corrales, L., Latorre-Esteves, M., Ramirez-Vick, J.E., 2014. Scaffold Design for Bone Regeneration. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 14 (1): 15–56. <https://doi.org/10.1166/jnn.2014.9127>

- Putra, I., 2011. FINITE ELEMEN METHOD (FEM) [WWW Document]. URL <https://irianpoo.blogspot.com/2011/09/finite-elemen-method-fem.html>
- Revell, P.A., Damien, E., Zhang, X.S., Evans, P., Howlett, C.R., 2004. The effect of magnesium ions on bone bonding to hydroxyapatite coating on titanium alloy implants. *Bioceramics, Vol 16*, 254–2 447–450. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.254-256.447>
- Rincón-Kohli, L., Zysset, P.K., 2009. Multi-axial mechanical properties of human trabecular bone. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 8 (3): 195–208. <https://doi.org/10.1007/s10237-008-0128-z>
- S. Suresh, 1991. Fatigue of Materials, Cambridge Solid State Science Series.
- Salahshoor, M., Guo, Y.B., 2011. Surface integrity of biodegradable Magnesium-Calcium orthopedic implant by burnishing. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 4 (8): 1888–1904. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.06.006>
- Seeman, E., Delmas, P.D., 2006. Bone quality--the material and structural basis of bone strength and fragility. *The New England journal of medicine*, 354 (21): 2250–2261. <https://doi.org/10.1056/NEJMra053077>
- Senatov, F.S., Niaza, K. V., Stepashkin, A.A., Kaloshkin, S.D., 2016. Low-cycle fatigue behavior of 3d-printed PLA-based porous scaffolds. *Composites Part B: Engineering*, 97 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.067>
- Shaw, B. a, 2003. Corrosion Resistance of Magnesium Alloys, in: ASM Handbook. pp. 692–96.
- Shi, X., Sherry Liu, X., Wang, X., Edward Guo, X., Niebur, G.L., 2010. Type and orientation of yielded trabeculae during overloading of trabecular bone along orthogonal directions. *Journal of Biomechanics*, 43 (13): 2460–2466. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.05.032>
- Song, G.L., Atrens, A., 1999. Corrosion mechanisms of magnesium alloys. *Advanced Engineering Materials*, 1 (1): 11–33. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1527-2648\(199909\)1:1<11::AID-ADEM11>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1527-2648(199909)1:1<11::AID-ADEM11>3.0.CO;2-N)
- sridianti, 2016. No Title [WWW Document]. URL

- <http://www.sridianti.com/jenis-jaringan-tulang-kortikal-kanselus.html>
(accessed 2.23.18).
- Sterling, J.A., Guelcher, S.A., 2014. Biomaterial scaffolds for treating osteoporotic bone. *Current Osteoporosis Reports*, 12 (1): 48–54.
<https://doi.org/10.1007/s11914-014-0187-2>
- Sulong, M.A., Belova, I. V., Boccaccini, A.R., Murch, G.E., Fiedler, T., 2016. A model of the mechanical degradation of foam replicated scaffolds. *Journal of Materials Science*, 51 (8): 3824–3835.
<https://doi.org/10.1007/s10853-015-9701-x>
- Susatio, Y., 2004. Dasar-dasar Metode Elemen Hingga. Andi, Yogyakarta.
- Syahrom, A., Abdul Kadir, M.R., Abdullah, J., Öchsner, A., 2013. Permeability studies of artificial and natural cancellous bone structures. *Medical Engineering and Physics*, 35 (6): 792–799.
<https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.08.011>
- Taylor, D., O'Reilly, P., Vallet, L., Lee, T.C., 2003. The fatigue strength of compact bone in torsion. *Journal of Biomechanics*, 36 (8): 1103–1109.
[https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(03\)00104-0](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(03)00104-0)
- Tommasini, S.M., Nasser, P., Schaffler, M.B., Jepsen, K.J., 2005. Relationship between bone morphology and bone quality in male tibias: Implications for stress fracture risk. *Journal of Bone and Mineral Research*, 20 (8): 1372–1380. <https://doi.org/10.1359/JBMR.050326>
- Utama, R., Akbar, P., Prakoso, T., Nugrasyah, A., Amir, D., Saad, P., Syahrom, A., Basri, H., 2021. Fatigue Prediction of Porous Magnesium Bone Scaffold Using Finite Element Method. 7 162–168.
- Utami, N.P.E., Chandra, H., 2017. Mechanical properties analysis of Al-9Zn-5Cu-4Mg cast alloy by T5 heat treatment, in: MATEC Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710101009>
- Vormann, J., 2003. Magnesium: Nutrition and metabolism. *Molecular Aspects of Medicine*, 24 (1–3): 27–37. [https://doi.org/10.1016/S0098-2997\(02\)00089-4](https://doi.org/10.1016/S0098-2997(02)00089-4)
- Wikipedia, 2013. Types of mesh. *Wiki*.
- Wirakusumah, E., 2007. Mencegah Osteoporosis. Niaga Swadaya, Jakarta.

- Witte, F., Kaese, V., Haferkamp, H., Switzer, E., Meyer-Lindenberg, A., Wirth, C.J., Windhagen, H., 2005. In vivo corrosion of four magnesium alloys and the associated bone response. *Biomaterials*, 26 (17): 3557–3563. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.09.049>
- Woodruff, M.A., Lange, C., Reichert, J., Berner, A., Chen, F., Fratzl, P., Schantz, J.T., Hutmacher, D.W., 2012. Bone tissue engineering: From bench to bedside. *Materials Today*, 15 (10): 430–435. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(12\)70194-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(12)70194-3)
- Yamamoto, E., Crawford, R.P., Chan, D.D., Keaveny, T.M., 2006. Development of residual strains in human vertebral trabecular bone after prolonged static and cyclic loading at low load levels. 39 1812–1818. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.05.017>
- Yaqin, R.I., Prasetyo, A.B., Haritsah, M., Maruli, B., Pakpahan, T., 2020. STUDI NUMERIK UMUR KELELAHAN (FATIGUE LIFE) PADA PROPELLER KAPAL PENANGKAP IKAN DENGAN KAPASITAS MESIN 24 HP. 6 8–17.
- Zainal Abidin, N.I., Atrens, A.D., Martin, D., Atrens, A., 2011. Corrosion of high purity Mg, Mg₂Zn_{0.2}Mn, ZE41 and AZ91 in Hank's solution at 37°C. *Corrosion Science*, 53 (11): 3542–3556. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.06.030>
- Zhuang, H., Han, Y., Feng, A., 2008. Preparation, mechanical properties and in vitro biodegradation of porous magnesium scaffolds. *Materials Science and Engineering C*, 28 (8): 1462–1466. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2008.04.001>
- Zreiqat, H., Howlett, C.R., Zannettino, A., Evans, P., Schulze-Tanzil, G., Knabe, C., Shakibaei, M., 2002. Mechanisms of magnesium-stimulated adhesion of osteoblastic cells to commonly used orthopaedic implants. *Journal of Biomedical Materials Research*, 62 (2): 175–184. <https://doi.org/10.1002/jbm.10270>

