

**TESIS**

**ANALISIS PENGARUH DEGRADASI DINAMIS  
TERHADAP KARAKTERISTIK MORFOLOGI DAN  
PERILAKU MEKANIS PERANCAH TULANG  
MAGNESIUM BERPORI**



**AKBAR TEGUH PRAKOSO  
NIM. 03032681721003**

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

**TESIS**

**ANALISIS PENGARUH DEGRADASI DINAMIS  
TERHADAP KARAKTERISTIK MORFOLOGI DAN  
PERILAKU MEKANIS PERANCAH TULANG  
MAGNESIUM BERPORI**

**Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
Magister Teknik**



**AKBAR TEGUH PRAKOSO  
NIM. 03032681721003**

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

## HALAMAN PENGESAHAN

### ANALISIS PENGARUH DEGRADASI DINAMIS TERHADAP MORFOLOGI DAN PERILAKU MEKANIS PERANCAH TULANG MAGNESIUM BERPORI

#### TESIS

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

Oleh:  
**AKBAR TEGUH PRAKOSO**  
03032681721003

Menyetujui  
Pembimbing I



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

Palimbang, 22 November 2019  
Pembimbing II



Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D  
NIP. 197901052003121002

Mengetahui,

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Sriwijaya

Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S., Ph.D  
NIP. 196900909187031004

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D  
NIP. 197012251997021001


## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Tesis ini dengan judul "ANALISIS PENGARUH DEGRADASI DINAMIS TERHADAP MORFOLOGI DAN PERILAKU MEKANIS PERANCAH TULANG MAGNESIUM BERPORI" telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Sriwijaya pada tanggal 22 November 2019


Palembang, 22 November 2019

### Pembimbing:

1. Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri  
NIP. 195802011984031002
2. Agung Mataram, S.T.,M.T.,Ph.D  
NIP. 197901052003121002




(.....)



(.....)

### Penguji:


1. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D  
NIP. 197112251997021001
2. Amir Arifin, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 197112251997021001
3. Dr. Ir. Hendri Chandra., M.T  
NIP. 196004071990031003



(.....)



(.....)



(.....)

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Sriwijaya

Prof. Ir. Subriyer Nasir, M.S., Ph.D  
NIP. 196900909187031004

Koordinator Program Studi  
Magister Teknik Mesin

Agung Mataram, S.T.,M.T.,Ph.D.  
NIP. 197901052003121002

JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No. :  
Diterima Tanggal :  
Paraf :

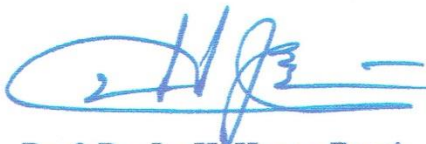
TESIS

NAMA : AKBAR TEGUH PRAKOSO  
NIM : 03032681721003  
JURUSAN : TEKNIK MESIN  
BIDANG STUDI : PERANCANGAN MESIN  
JUDUL : ANALISIS PENGARUH DEGRADASI  
DINAMIS TERHADAP KARAKTERISTIK  
MORFOLOGI DAN PERILAKU  
MEKANIS PERANCAH TULANG  
MAGNESIUM BERPORI  
DIBUAT TANGGAL : 1 AGUSTUS 2018  
SELESAI TANGGAL : 22 NOVEMBER 2019

Palembang, 22 November 2019

Menyetujui  
Pembimbing I

Pembimbing II




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



Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D  
NIP. 197901052003121002

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

## HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Akbar Teguh Prakoso

NIM : 03032681721003

Judul : Analisis Pengaruh Degradasi Dinamis Terhadap Karakteristik Morfologi dan Perilaku Mekanis Perancah Tulang Magnesium Berpori

Menyatakan bahwa Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi Pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Tesis 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, 22 November 2019



Akbar Teguh Prakoso  
NIM. 03032681721003

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Akbar Teguh Prakoso

NIM : 03032681721003

Judul : Analisis Pengaruh Degradasi Dinamis Terhadap Karakteristik Morfologi dan Perilaku Mekanis Perancah Tulang Magnesium Berpori

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, 22 November 2019



Akbar Teguh Prakoso  
NIM. 03032681721003

## KATA PENGANTAR

Pertama, penulis mengucapkan syukur dan berterimakasih kepada Tuhan Yang Maha Esa 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. Keluarga Penulis, kedua Orangtua 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 I yang dengan ikhlas dan tulus telah membimbing, mengarahkan, mendidik, memotivasi serta banyak memberikan sarana kepada penulis dari awal hingga selesainya skripsi ini.
3. Bapak . Agung Mataram, S.T.,M.T.,Ph.D selaku Ketua Prodi Magister S2 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya sekaligus Dosen Pembimbing II yang dengan ikhlas dan tulus telah membimbing, mengarahkan, mendidik, memotivasi serta banyak memberikan sarana kepada penulis dari awal hingga selesainya tesis ini ini.
4. Bapak Assoc. Prof. Dr. Ardiyansyah Syahrom, ST., M.Eng. selaku sekaligus Direktur *Sport and Innovation Technology Centre* (MEDITEC) di Universiti Teknologi Malaysia yang memberikan ijin, bimbingan dan arahan penelitian, serta memotivasi penulis.
5. Bapak Dr. Mohd Ayub Sulong yang merupakan anggota asosiasi *Sport and Innovation Technology Centre* telah membimbing dan memberi arahan selama penelitian serta memotivasi penulis
6. Bapak Dr. Amir Putra Bin Md Saad, B.Eng., M.Eng. yang merupakan anggota asosiasi *Sport and Innovation Technology Centre* yang telah



membimbing dan memberi arahan selama penelitian serta memotivasi penulis

7. Bapak Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D 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
8. Bapak Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T. Selaku Ketua KBK Konstruksi Jurusan Teknik mesin yang telah membimbing dan memberi arahan selama penelitian serta memotivasi penulis
9. Pak Agung Kristian selaku Staf Administrasi Prodi S2 Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah banyak membantu dalam proses administrasi.
10. Tri Satya Ramadhoni, ST., Muhammad Imam Ammarullah, Irfan Gani, Ruben,. selaku teman dan rekan sesama peneliti yang telah membantu saya dalam menjalankan penelitian, membuat Skripsi, hingga kebersamaian saya di berbagai 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 Degradasi Dinamis Terhadap Karakteristik Morfologi dan Perilaku Mekanis Perancah Tulang Magnesium Berpori” dapat memberikan manfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di negara Indonesia serta menjadi referensi bagi yang akan mengkaji dimasa yang akan datang.

Palembang, November 2019

**Penulis**

**Akbar Teguh Prakoso**  
**NIM. 03032681721003**

## RINGKASAN

### ANALISIS PENGARUH DEGRADASI DINAMIS TERHADAP KARAKTERISTIK MORFOLOGI DAN PERILAKU MEKANIS PERANCAH TULANG MAGNESIUM BERPORI

Karya Tulis Ilmiah berupa Tesis, 25 November 2019

Akbar Teguh Prakoso; dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. Hasan Basri & Agung Mataram, S.T.,M.T.,Ph.D

*The Impact of Dynamic Degradation on the Morphological and Mechanical Behaviour of Porous Magnesium Scaffold*

CIX + 161 halaman, 12 tabel, 45 gambar, 4 lampiran

#### RINGKASAN

*Bone scaffold* dari segi fungsionalitas sebagai bantalan beban (*load bearing*) mengharuskan material memiliki kekuatan yang baik dan tidak hanya saja pada saat implan ditanamkan tetapi juga ketika pada saat terjadi proses degradasi pada periode waktu tertentu dimana ketika berkontak dengan sumsum tulang. Pada penelitian ini magnesium berpori (Mg) dengan struktur *open-cellular* berpotensi dikembangkan sebagai rekayasa jaringan *bone scaffold*. Sampel implan *bone scaffold* yang terbuat dari magnesium murni dengan porositas yang berbeda direndam dengan laju aliran dinamis di dalam cairan *simulated body fluid*. Degradasi pada biomaterial *bone scaffold* dapat menyebabkan perubahan morfologinya. Sampel pada setiap implan *bone scaffold* setelah terdegradasi dilakukan pemindaian dengan menggunakan micro-CT untuk menentukan porositas keseluruhan, arsitektur dan mengembangkan pemodelan *finite element*. Beban kompresi diaplikasi pada model untuk mensimulasikan pengujian tekan dan distribusi tegangan dan regangan dapat dihitung. Dengan simulasi menggunakan *Finite Element Method (FEM)*, sifat mekanis setiap sampel sebelum dan setelah terdegradasi dapat dihitung. Sifat mekanis pada implan *bone scaffold* seperti modulus elastisitas dan 0,2% *yield stress* diperoleh dari hasil simulasi. Temuan ini kemudian divalidasi dengan nilai-nilai yang diperoleh dari tes eksperimental. Hasil simulasi numerik yang ditemukan sesuai dengan eksperimental. Selain itu, penyelidikan ini menemukan bahwa sifat mekanis berkurang secara sistematis selama periode waktu 72 jam perendaman. Hasil penelitian menunjukkan hubungan yang kuat antara sifat mekanis dan morfologi (fraksi volume (BV/TV), porositas dan luas area permukaan). Namun galat error maksimum perbandingan antara simulasi dengan eksperimental mencapai 17%. Hasil dapat menunjukkan bahwa parameter morfologi berpengaruh terhadap sifat mekanisnya.

**Kata Kunci** : Perancah tulang, Perilaku mekanis, magnesium berpori, *FEM*, morfologi, *MicroCT Scan*

Kepustakaan : 86 (1997 – 2019)

## SUMMARY

### *THE IMPACT OF DYNAMIC DEGRADATION ON THE MORPHOLOGICAL AND MECHANICAL BEHAVIOUR OF POROUS MAGNESIUM SCAFFOLD*

*Article Scientific; Thesis, November 25<sup>th</sup>, 2019*

*Akbar Teguh Prakoso; supervised by Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri & Agung Mataram, S.T.,M.T.,Ph.D*

*Analisis Pengaruh Degradasi Dinamis Terhadap Karakteristik Morfologi dan Sifat Mekanis Perancah Tulang Magnesium Berpori*

CIX + 161 Pages, 12 tables, 45 Figures, 4 attachments

Bone Scaffold in terms of functionality as load-bearing applications requires that the material should have sufficient strength not only at the moment of being implanted but also when the material degrades over the time while remaining in contact with bone marrow. In this work, porous magnesium (Mg) with an open-cellular structure, potentially employed as bone tissue engineering scaffolds. The samples of bone scaffolds made of pure magnesium with different porosities were immersed and subjected to dynamic flow rate of simulated body fluid. Degradation on biomaterial bone scaffold leads to changes of the morphology. Samples of implant bone scaffolds were scanned using Micro-CT to determine the overall porosity, architecture and to develop finite element models. Compressive loads were applied on models to simulate compressive test and stress and strain distributions were calculated. General properties for instance, elastic modulus, 0.2% offset yield stress and plateau stress were collected from simulation results. The findings were then validated with the values obtained from the experimental result. The numerical simulation result showed good agreement with the experimental test. The present investigation found that the mechanical properties decreased systematically over a 72-hours period of immersion time. Results showed strong relationship between morphology parameters (volume fraction, porosity and surface area) and mechanical properties of bone scaffolds. However, the maximum percentage error comparison between simulation result with experimental test reached 17%. The results indicate that the microarchitectural parameters can affect the mechanical properties.

**Keywords** : *Bone Scaffold, Mechanical Properties, Porous Magnesium, FEM, Morphology, MicroCT Scan*

## DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
KATA PENGANTAR	v
RINGKASAN	
SUMMARY	
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tinjauan literatur	7
2.2 Definisi Tulang dan Jenis Tulang serta Strukturnya	8
2.3 Material berpori	9
2.4 Rekayasa Jaringan Perancah Tulang	10
2.5 Tingkah laku mekanis perancah Tulang Berpori	12
2.6 Potensial Material Mg sebagai Implan Perancah Tulang	14
2.7 Pendekatan Teoritis Dalam Mengevaluasi Tingkah Laku Mekanis Struktur Berpori	16
2.8 Penerapan Komputasi Elemen Hingga Dalam Rekayasa Jaringan	24
2.9 Mekanisme Degradasi Mg Berpori	26
2.10 Magnesium berpori: konsep dan perspektif	26

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Pengumpulan Data	30
3.2.1 Geometri Sampel Perancah Tulang Mg Berpori	30
3.2.2 Properti Material Mg Padat	31
3.2.3 Data Pembebanan pada Pengujian Tekan	32
3.2.4 Citra Gambar Perancah Tulang Hasil Pemindaian $\mu CT$	32
3.3 Pemodelan Geometri pada Sampel Perancah Tulang	333
3.3.1 Pemodelan Geometri 3D Perancah Tulang Sebelum Terdegradasi	3
3.3.2 Pemodelan Geometri 3D Perancah Tulang Setelah Terdegradasi	34
3.4 Simulasi Elemen Hingga	46
3.5 Analisa Pengujian Tekan Menggunakan Simulasi Elemen Hingga	40
3.6 Prosedur Simulasi	43
3.6.1 Pemodelan Geometri 3D Perancah Tulang Setelah Terdegradasi	43
3.6.2 Penentuan Material	44
3.6.3 Penentuan Kondisi Batas	47
3.6.4 Menjalankan Simulasi	50
3.6.5 Penyelesaian Model (model solver)	52
3.7 Studi Konvergen	61
3.8 Studi morfologi perancah Mg Berpori	63
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	65
4.1 Pendahuluan	65
4.2 Kurva Tegangan dan Regangan	65
4.3 Pengaruh perilaku mekanis perancah Mg Berpori dibawah perendaman dinamis	67
4.4 Karakteristik Morfologi Perancah Mg Berpori dibawah Perendaman Dinamis	71

4.5 Hubungan antara morfologi dan perilaku mekanis Mg berpori	73
4.6 Karakteristik Deformasi Perancah Mg Berpori	76
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	78
5.1 Kesimpulan	78
5.2 Saran	79
DAFTAR RUJUKAN	65
LAMPIRAN	65
1 Lampiran Subroutine	89
2 Lampiran Raw Data Hasil Simulasi	109
3 Lampiran Konvergen Studi	157
4 Lampiran Hasil Manual Segmentasi	159

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	<i>State of the Art</i> penelitian (SOTA) 8
Gambar 2.2	Rangka dan struktur tulang manusia 9
Gambar 2.3	Jenis-jenis logam berpori: (a) open-cell foam (b) closed-cell foam 10
Gambar 2.4	Kurva Tegangan Regangan Material berpori 13
Gambar 2.5	Tipikal bentuk struktur kisi (lattice) BCC pada penelitian 16
Gambar 2.6	Sel satuan struktur kisi BCC pada penelitian Ushijima <i>et al</i> 17
Gambar 2.7	Penentuan densitas relatif sel satuan dari struktur kisi BCC 17
Gambar 2.8	Geometri pada unit cell BCC, representasikan kondisi pembebanan dan pergerakan setiap batang struktur (Ushijima et al., 2011) a) Geometri pada unit cell BCC, (b) kondisi pembebanan, (c) pergerakan 'A' relatif terhadap 'B' 18
Gambar 2.9	Mode kegagalan pada struktur kisi BCC 19
Gambar 2.10	Pergerakan struktur batang A relatif terhadap B 20
Gambar 2.11	Geometri 3D sel satuan dari berbagai bentuk struktur kisi 23
Gambar 2.12	Hubungan antara modulus elastisitas dan porositas perancah tulang untuk CaP ( <i>calcium phosphate</i> ) 25
Gambar 2.13	Diagram skema konsep penyembuhan dan perilaku degradasi perancah tulang 27
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian 29
Gambar 3.2	Model sampel perancah Mg berpori 30
Gambar 3.3	Skematik proses pengambilan citra gambar pada sampel perancah dengan metode pemindai $\mu CT$ 33
Gambar 3.4	Pemodelan 3D sampel perancah 34
Gambar 3.5	Skematik tahapan rekonstruksi 3D perancah setelah terdegrasi 34
Gambar 3.6	Proses thresholding dengan metode iterasi 35

Gambar	3.7	Model 3D yang telah di rekonstruksi	36
Gambar	3.8	Perbandingan antara sampel perancah aktual dan hasil rekonstruksi	38
Gambar	3.9	Semua sampel dikonversi dalam bentuk STL (stereolithography) untuk menghindari hilangnya detail geomertri pada sampel	39
Gambar	3.10	Tampilan meshing hasil dari import NAS dengan menggunakan perangkat lunak MSC Marc	40
Gambar	3.11	Kondisi batas time-dependent untuk merepresentasikan pergerakan pelat tekan atas pada mesin uji tekan	41
Gambar	3.12	Kondisi batas time-dependent untuk merepresentasikan pergerakan pelat tekan atas pada mesin uji tekan	42
Gambar	3.13	<i>User-subroutine</i> merekam gaya reaksi $F_N$ setiap nodal di permukaan atas sampel	42
Gambar	3.14	<i>Import</i> model perancah yang telah di meshing	44
Gambar	3.15	Proses input parameter untuk prosedur simulasi	45
Gambar	3.16	Proses input parameter untuk prosedur simulasi	45
Gambar	3.17	Proses penentuan elemen struktur	46
Gambar	3.18	Proses input <i>displacement</i>	47
Gambar	3.19	Penentuan kondisi batas time-dependent	48
Gambar	3.20	Penentuan kondisi batas time-dependent	50
Gambar	3.21	Proses running simulasi dengan perangkat lunak Msc Marc Mentat yang terintegrasi dengan bahasa pemograman Fortran	51
Gambar	3.22	Proses running simulasi dengan perangkat lunak Msc Marc Mentat yang terintegrasi dengan bahasa pemograman Fortran	51
Gambar	3.23	Grafik kurva tegangan-regangan magnesium berpori sampel A sebelum terdegradasi (porositas 30%)	60
Gambar	3.24	Perbandingan antara sampel perancah aktual dan hasil rekonstruksi	62
Gambar	3.25	Perbandingan antara sampel perancah aktual dan hasil rekonstruksi	63
Gambar	4.1	Perbandingan grafik kurva tegangan regangan perancah Mg berpori hasil eksperimen dan simulasi	66



Gambar 4.2	Perbandingan grafik kurva tegangan-regangan perancah Mg berpori hasil simulasi setelah terdegradasi	67
Gambar 4.3	Perubahan nilai modulus elastisitas efektif perancah terhadap waktu degradasi	70
Gambar 4.4	Perubahan nilai kekuatan luluh perancah terhadap waktu degradasi	
Gambar 4.5	Perubahan fraksi volume Mg berpori dibawah perendaman dinamis (a) fraksi volume (BV/TV), (b) Porositas dan (c) luas permukaan	
Gambar 4.6	Hubungan antara perilaku mekanis perancah Mg berpori meliputi modulus elastisitas efektif, kekuatan luluh dan parameter morfologi (a) fraksi volume (bv/tv), (b) porositas dan (c) luas permukaan	
Gambar 4.7	Perbandingan grafik kurva tegangan regangan perancah Mg berpori hasil ekasperimental dan simulasi	

## DAFTAR TABEL

		Halaman	
Tabel	2.1	Modulus elastisitas efektif beberapa struktur kisi	24
Tabel	2.2	Periode penyembuhan tulang dari berbagai lokasi fraktur	28
Tabel	3.1	Morfologi perancah tulang Mg berpori	31
Tabel	3.2	Sifat fisis dan mekanis Mg Solid	31
Tabel	3.3	Hasil model virtual sampel A di bawah perendaman 24 jam yang direkonstruksi dengan segmentasi secara iterasi	36
Tabel	3.4	Hasil model virtual seluruh sampel yang telah direkonstruksi dengan segmentasi secara iterasi	37
Tabel	3.5	Pemberian permindahan maksimum 1.5 mm selama 1 detik dengan total step 100 dan increment 0.01	49
Tabel	3.6	Raw data hasil simulasi gaya dan displacement setiap step untuk sampel A perancah Mg (0 jam)	52
Tabel	3.7	Data hasil simulasi sifat mekanis magnesium berpori pada	55
Tabel	3.8	Morfologi keseluruhan pada perancah sebelum dan setelah terdegradasi	64
Tabel	4.1	Perbandingan nilai modulus efektif perancah dari hasil simulasi MEH dan eksperimental	68
Tabel	4.2	Perbandingan nilai kekuatan luluh dari hasil prediksi simulasi MEH dengan hasil eksperimental	69

## DAFTAR ISTILAH

Istilah	Penjelasan
<i>Biodegradable</i>	Material bersifat mampu luruh (degradasi) didalam jaringan tulang
<i>Bone scaffold</i>	Perancah tulang
<i>In vivo</i>	Pengujian yang berhubungan dengan makhluk hidup
toksikologis	Bersifat toksik (beracun)
Efek stimulasi	Merangsang pertumbuhan jaringan tulang
<i>Stress shielding</i>	Ketidakcocokan antara modulus elastisitas tulang kanelus dan modulus elastisitas implan perancah tulang
<i>Jaringan tulang</i>	sel-sel tulang atau osteon yang tersimpan di dalam matriks, matriksnya terdiri dari zat perekat kolagen dan endapan garam-garam mineral terutama garam kalsium
<i>SBF(simulated bofy fluid)</i>	Cairan dengan konsentrasi ion yang dekat dengan plasma darah manusia
<i>Computed Tomography (CT)</i>	Pemindaian (scanning) menggunakan sistem imaging digital dan sinar-X untuk memperoleh citra penampang tubuh
<i>Mechanical integrity</i>	material memiliki kekuatan yang baik saat terjadi proses degradasi pada periode waktu tertentu ketika implan perancah tulang berkontak dengan sumsum tulang
<i>Image processing</i>	Pengolahan citra gambar
<i>Bone grafting</i>	Operasi cangkok tulang
<i>autologous graft</i>	Cangkok tulang dimana jaringan tulang berasal dari individu yang sama
<i>allogenic graft</i>	Cangkok tulang dimana jaringan tulang berasal dari individu yang berbeda pada spesies yang sama
<i>xenogenic graft</i>	Cangkok tulang dimana jaringan tulang berasal pada spesies yang berbeda
<i>Non-toxic</i>	Bersifat tidak beracun
<i>Lattice</i>	Struktur kisi
<i>inflammation</i>	Peradangan pada tulang
<i>resholding</i>	Metode segmentasi pada pengolahan citra gambar

*greyscale*

Warna-warna piksel yang berada dalam rentang gradasi warna hitam dan putih

# ANALISIS PENGARUH DEGRADASI DINAMIS TERHADAP KARAKTERISTIK MORFOLOGI DAN PERILAKU MEKANIS PERANCAH TULANG MAGNESIUM BERPORI

Akbar Teguh Prakoso<sup>(1)</sup>, Hasan Basri<sup>(1)</sup>, Agung Mataram<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indralaya 30662, Ogan Ilir, Sumatera Selatan, Indonesia

Email: hasan\_basri@unsri.ac.id

## Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan morfologi akibat perendaman dinamis terhadap perilaku mekanis perancah tulang magnesium berpori. Sampel perancah direndam dalam waktu 24, 28 dan 72 jam. Sembilan sampel setelah terdegradasi dilakukan pemindaian dengan alat pemindai microCT dan direkonstruksi menjadi model 3D serta dilanjutkan analisis elemen hingga untuk memperoleh perilaku mekanisnya. Sifat mekanis meliputi modulus elastisitas efektif ( $E_{ff}$ ) dan tegangan luluh ( $\sigma_{0.2}$ ) dari simulasi elemen hingga didapatkan kemudian dibandingkan dengan hasil eksperimental. Hasilnya menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas efektif dan tegangan luluh mendekati kondisi aktual. Degradasi akibat perendaman dinamis pada sampel perancah Mg berpori secara signifikan mempengaruhi perubahan morfologi sampel. Hubungan antara parameter morfologi meliputi fraksi volume, porositas dan luas area permukaan sampel terhadap perilaku mekanis telah sepenuhnya diperoleh dalam penelitian ini.

**Kata Kunci:** Perancah tulang Mg berpori, perilaku mekanis, simulasi elemen hingga, morfologi

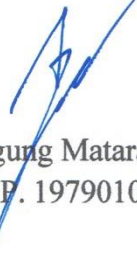
Palembang, 22 November 2019

Pembimbing I

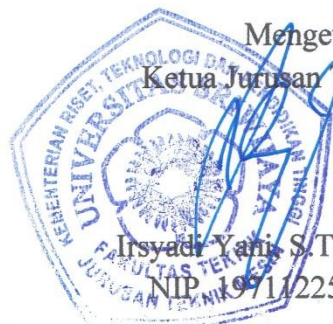


Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri  
NIP. 195802011984031002

Pembimbing II



Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D  
NIP. 197901052003121002



Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Mesin

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

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Material magnesium (Mg) dan paduannya dianggap sebagai logam mampu luruh (*biodegradable*) yang berpotensi sebagai kandidat biomaterial. Material yang dapat terurai secara biologis seperti Mg dan paduannya memiliki fitur menarik yang menjadikannya cocok sebagai perancah tulang (*bone scaffold*). Material Mg memiliki potensi untuk terdegradasi secara *in-vivo* tanpa menyebabkan masalah toksikologis. Unsur Mg dapat dengan mudah ditemukan di dalam jaringan tulang manusia karena fungsinya sangat penting dalam metabolisme tubuh manusia. Selain itu, Mg dapat menginduksi efek stimulasi dalam pertumbuhan tulang karena membantu pembentukan apatit tulang seperti kristal hidroksiapatit (HA) (Bigi et al., 1993; Staiger et al., 2006; Zhang et al., 2014). Sebagai tambahan, untuk menghindari fenomena *stress shielding*, modulus elastisitas efektif Mg dapat dikontrol dan diatur secara tepat dengan membuat struktur berpori yang sesuai dengan modulus elastisitas tulang kanvas (0,01–2,0 GPa). Faktor-faktor tersebut telah mendukung gagasan penggunaan material Mg yang dapat terurai untuk diterapkan dalam rekayasa jaringan tulang (Brown et al., 2015; Yusop et al., 2012).

Fenomena degradasi pada perancah Mg berpori dan paduannya dimulai dari area permukaan yang berkontak langsung dengan sum-sum tulang pada saat perancah telah diimplantasikan. Kerusakan struktur perancah tulang meningkat dengan waktu pemakaian yang lama. Ada tiga fenomena degradasi pada perancah ketika berada di jaringan tulang antara lain degradasi yang lambat, keseimbangan antara degradasi perancah dan pertumbuhan jaringan tulang, serta degradasi perancah yang terlalu cepat. Laju degradasi perancah Mg sebagai pendukung struktur sementara pada tahap awal penyembuhan tulang sangat penting untuk dikontrol (Y.F. Zheng, X.N. Gu, 2014).

Pada pengujian secara eksperimental, degradasi Mg berpori untuk aplikasi perancah tulang ditentukan melalui pengujian perendaman statis dimana perancah Mg hanya direndam dalam larutan SBF (*Simulated Body Fluid*) (Cao et al., 2013; Cheng et al., 2016; Gu et al., 2009; Johnston et al., 2015). Namun, perendaman statis memiliki keterbatasan yaitu belum sepenuhnya mewakili kondisi aktual lingkungan tulang kancellus dimana sum-sum tulang (*bone marrow*) mengalir. Pengujian degradasi dibawah perendaman dinamis perancah Mg berpori dalam larutan SBF pertama kali telah berhasil dilakukan oleh Md. Saad *et al.* (Md. Saad et al., 2017, 2016). Pengujian degradasi dinamis ini mengkondisikan simulasi aliran fluida SBF seperti halnya aliran pada sumsum tulang kancellus ditubuh manusia dengan masing-masing variasi laju aliran 0.025 ml/min, 0.4ml/min dan 0.8 ml/min (Birmingham et al., 2015; Gomes et al., 2003; Grimm and Williams, 1997; Metzger et al., 2015; Zhao et al., 2015a).

Pada penelitian Md. Saad *et al.* (Md Saad et al., 2016) laju degradasi pada perancah Mg berpori dapat dihitung melalui pengukuran berat yang hilang (*weight loss measurement*). Kemudian morfologi perancah tulang meliputi fraksi volume dan porositas diperoleh berdasarkan perhitungan dari hubungan volume, densitas dan massa. Namun keterbatasan metode pengukuran berat yang hilang dalam memperoleh informasi morfologi perancah tulang ketika diimplantasikan didalam jaringan hidup sangat sulit dan hampir mustahil.

Pengukuran morfologi perancah tulang pada pengujian *in-vivo* sangat efektif dengan metode *computed tomography* (CT). Pemindaian *micro-CT* ( $\mu$ CT) adalah metode non-destruktif yang memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menganalisis morfologi pada aplikasi rekayasa jaringan (Fischerauer et al., 2013; Hedberg et al., 2005; Yu et al., 2018). Metode ini mampu memberikan rincian morfologi struktur material hingga ketingkat makro, terutama untuk struktur berpori yang tidak teratur dan rumit. Selain itu, Md. Saad *et al.* (Md Saad et al., 2016) melakukan eksperimental pengujian kompresi uniaksial untuk mendapatkan perilaku mekanis perancah Mg terkait dengan modulus elastisitas efektif ( $E_{ff}$ ) dan tegangan luluh sebelum dan setelah terdegradasi. Sama halnya yang telah disebutkan diatas, keterbatasan eksperimental ini tidak mungkin digunakan untuk menilai perilaku perancah

ketika implan berada di dalam tulang. Solusi alternatifnya adalah dengan pendekatan simulasi elemen hingga (MEH). Keterbatasan metode yang dilakukan oleh Md. Saad *et al.* (Md Saad et al., 2016) memberikan kesempatan ruang bagi peneliti untuk mengkaji morfologi dan perilaku karakteristik mekanik perancah Mg berpori sebelum dan setelah degradasi dibawah perendaman dinamis dengan kombinasi pendekatan  $\mu$ CT dan simulasi (MEH).

## 1.2 Rumusan Masalah

Penggunaan magnesium dari segi fungsionalitas sebagai bantalan beban mengharuskan material memiliki kekuatan yang baik dan tidak hanya saja pada saat implan perancah tulang ditanamkan tetapi juga ketika pada saat terjadi proses degradasi pada periode waktu tertentu ketika implan perancah tulang berkontak dengan sumsum tulang. Hal ini sangat penting menjaga kekuatan implan perancah tulang setidaknya sampai menyembuhkan tulang (Pellicer et al., 2013). Inilah yang disebut integritas mekanik (*mechanical integrity*). Perubahan fisik morfologi pada struktur Mg berpori akibat perendaman dinamis dapat menyebabkan penurunan perilaku mekanis struktur perancah Mg berpori antara lain modulus elastisitas efektif ( $E_{ff}$ ) dan kekuatan luluhnya ( $\sigma_{0.2\%}$ ). Namun mengkaji perubahan fisik serta perilaku struktur mekanis 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, integritas mekanik perancah Mg berpori dapat diantisipasi melalui pendekatan metode pemindaian micro-CT, dimana perubahan morfologinya dapat dianalisis sebagai fungsi dari perilaku mekanis struktur perancah. Perilaku mekanis struktur perancah sangat ditentukan oleh perilaku degradasinya terutama saat tulang dalam proses penyembuhan. Dengan mengetahui perubahan morfologi maka laju degradasi dan perilaku mekanis perancah tulang ketika ditanam di jaringan tulang dapat diprediksi dan dikontrol. Perubahan morfologi struktur perancah Mg berpori dan perilaku struktur



mekanismenya akibat fenomena degradasi didalam jaringan tulang dapat diverifikasi melalui kombinasi antara pendekatan pemindaian micro-CT dan analisis komputasi elemen hingga.

### 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam tesis ini tidak melebar sehingga lebih terarah dan terfokus, untuk itu disusunlah suatu batasan masalah dalam penulisannya, yaitu:

1. Data penelitian sekunder meliputi geometri perancah Mg berpori dengan ukuran 5 x 5 x 3 mm dan diameter pori 0.8 mm didapatkan berdasarkan penelitian dari (Md. Saad et al., 2016).
2. Data penelitian meliputi 3 model perancah tulang Mg berpori dengan variasi porositas yaitu 30%, 41%, dan 55% didapatkan berdasarkan penelitian dari (Md. Saad et al., 2016)
3. Data citra gambar sampel Mg berpori yang telah dilakukan pemindaian  $\mu$ CT dengan resolusi 17.2  $\mu$ m setelah degradasi dibawah perendaman dinamis dengan laju aliran 0.025ml/menit pada periode waktu 24, 48 dan 72 jam didapatkan dari penelitian Md.saad et al (Md Saad et al., 2017)
4. Pemodelan 3D sampel setelah terdegradasi merupakan hasil pemindaian  $\mu$ CT dari sampel eksperimen.
5. Kondisi perancah diasumsikan terdegradasi didalam jaringan tulang karena fenomena degradasi secara invitro hampir mendekati kondisi aktual
6. Material Mg yang akan input kondisi batas untuk simulasi MEH yaitu homogen, isotropik dan *linear elastis-plastis*.
7. Karakteristik morfologi perancah meliputi BV/TV, luas permukaan dan porositas diperoleh dengan menggunakan perangkat lunak *Materialise Mimics*

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dalam tesis ini adalah sebagai berikut

1. Memperoleh morfologi perancah tulang meliputi fraksi volume (BV/TV), luas permukaan, serta porositas sebelum dan setelah terdegradasi dibawah perendaman dinamis dengan kombinasi pendekatan pengolahan citra gambar hasil pemindaian  $\mu$ CT.
2. Mendapatkan perilaku mekanis struktur Mg berpori perancah meliputi modulus elastisitas efektif ( $E_{ff}$ ), tegangan luluh ( $\sigma_{0.2}$ ) sebelum dan setelah terdegradasi dibawah perendaman dinamis dengan metode pendekatan  $\mu$ CT dan simulasi elemen hingga.
3. Memperoleh hubungan antara morfologi perancah tulang meliputi fraksi volume (BV/TV), luas permukaan, serta porositas terhadap karakteristik perilaku mekanis struktur perancah tulang Mg berpori meliputi modulus elastisitas efektif ( $E_{ff}$ ), tegangan luluh ( $\sigma_{0.2}$ ) sebelum dan setelah terdegradasi dibawah perendaman dinamis dengan pendekatan regresi linier.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Studi ini sangat penting untuk mengkaji perilaku perancah tulang saat berada didalam jaringan hidup, dimana mengkorelasikan antara morfologi dan perilaku mekanis implan perancah Mg berpori. Ketika implan ditanamkan pada tulang, morfologi perancah dapat dipantau oleh dokter ortopedik dengan pemindaian micro-CT dan perilaku mekanis struktur perancah terkait dengan integritas mekanik dapat diprediksi.

Integritas mekanis perancah Mg berpori saat terjadi fenomena degradasi secara *in-vivo* ketika implan ditanamkan pada tubuh pasien dapat ditentukan menggunakan kombinasi metode pemindaian  $\mu$ CT dan simulasi elemen hingga. Dari data gambar pemindaian  $\mu$ CT, parameter seperti struktur morfologi material setelah terdegradasi dianalisis masing-masing menggunakan

pemindaian  $\mu$ CT dan tingkah laku mekanik terkait modulus elastisitas efektif ( $E_{ff}$ ) serta kekuatan luluh dapat dianalisis dengan simulasi elemen hingga (MEH). 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

- Ahmadkhaniha, D., Fedel, M., Heydarzadeh Sohi, M., Zarei Hanzaki, A., Deflorian, F., 2016. Corrosion behavior of magnesium and magnesium-hydroxyapatite composite fabricated by friction stir processing in Dulbecco's phosphate buffered saline. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.01.002>
- Allen, M.J., Myer, B.J., Millett, P.J., Rushton, N., 1997. Effect of particulate cobalt, chromium and cobalt-chromium alloy on human osteoblast-like cells in vitro. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 79-B (3): 475–487. <https://doi.org/10.1302/0301-620X.79B3.7415>
- Ashby, M., Evans, A., Fleck, N., Gibson, L., Hutchinson, J., Wadley, H., Delale, F., 2001. Metal Foams: A Design Guide. *Applied Mechanics Reviews*. <https://doi.org/10.1115/1.1421119>
- Baiker, M., Snoeks, T.J.A., Kaijzel, E.L., Que, I., Dijkstra, J., Lelieveldt, B.P.F., Löwik, C.W.G.M., 2012. Automated bone volume and thickness measurements in small animal whole-body MicroCT data. *Molecular Imaging and Biology*, 14 (4): 420–430. <https://doi.org/10.1007/s11307-011-0522-2>
- Banhart, J., Baumeister, J., 1998. Deformation characteristics of metal foams. *J. Mater. Sci.*, 33 1431.
- Bigi, A., Falini, G., Foresti, E., Gazzano, M., Ripamonti, A., 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)
- Birmingham, E., Kreipke, T.C., Dolan, E.B., Coughlin, T.R., Owens, P., McNamara, L.M., Niebur, G.L., McHugh, P.E., 2015. Mechanical Stimulation of Bone Marrow In Situ Induces Bone Formation in Trabecular Explants. *Annals of Biomedical Engineering*, 43 (4): 1036–1050. <https://doi.org/10.1007/s10439-014-1135-0>
- 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>
- Brown, A., Zaky, S., Ray, H., Sfeir, C., 2015. Porous magnesium/PLGA composite scaffolds for enhanced bone regeneration following tooth extraction. *Acta Biomaterialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.09.008>
- Cancedda, R., 2007. Kinetics of In Vivo Bone Deposition by Bone Marrow Stromal Cells Within a Resorbable Porous Calcium Phosphate Scaffold: An X-Ray Computed Microtomography Study. *Biotechnology and Bioengineering*, 98, No. 1 (Ii): 271–281. <https://doi.org/10.1002/bit>

- Cao, F., Shi, Z., Hofstetter, J., Uggowitzer, P.J., Song, G., Liu, M., Atrens, A., 2013. Corrosion of ultra-high-purity Mg in 3.5% NaCl solution saturated with Mg(OH)<sub>2</sub>. *Corrosion Science*, 75. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.05.018>
- Chandra, H., Mataram, A., Utami, N.P.E., 2019. The characterization of mechanical property and fatigue life of betel- falm fiber composite as environmentally-friendly material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 620 (Sriwijaya International Conference on Science, Engineering, and Technology): 1–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/620/1/012119>
- Chen, Y., Mak, A.F.T., Wang, M., Li, J., Wong, M.S., 2006. PLLA scaffolds with biomimetic apatite coating and biomimetic apatite/collagen composite coating to enhance osteoblast-like cells attachment and activity. *Surface and Coatings Technology*, 201 (3–4): 575–580. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.005>
- Chen, Y., Schellekens, M., Zhou, S., Cadman, J., Li, W., Appleyard, R., Li, Q., 2012. Design Optimization of Scaffold Microstructures Using Wall Shear Stress Criterion Towards Regulated Flow-Induced Erosion. 133 (1): 1–2. <https://doi.org/10.1115/1>
- Cheng, M.Q., Wahafu, T., Jiang, G.F., Liu, W., Qiao, Y.Q., Peng, X.C., Cheng, T., Zhang, X.L., He, G., Liu, X.Y., 2016. A novel open-porous magnesium scaffold with controllable microstructures and properties for bone regeneration. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/srep24134>
- Clark, G.C.F., Williams, D.F., 1982. The effects of proteins on metallic corrosion. *Journal of Biomedical Materials Research*. <https://doi.org/10.1002/jbm.820160205>
- Clarke, B., 2008. Normal bone anatomy and physiology. *Clinical journal of the American Society of Nephrology : CJASN*. <https://doi.org/10.2215/CJN.04151206>
- Dewidar, M.M., Lim, J.K., 2008. Properties of solid core and porous surface Ti-6Al-4V implants manufactured by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*, 454 (1–2): 442–446. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.12.143>
- Ding, Y., Wen, C., Hodgson, P., Li, Y., 2014. Effects of alloying elements on the corrosion behavior and biocompatibility of biodegradable magnesium alloys: A review. *Journal of Materials Chemistry B*. <https://doi.org/10.1039/c3tb21746a>
- Fischerauer, S.F., Kraus, T., Wu, X., Tangl, S., Sorantin, E., Hänzi, A.C., Löffler, J.F., Uggowitzer, P.J., Weinberg, A.M., 2013. In vivo degradation performance of micro-Arc-oxidized magnesium implants: A micro-CT study in rats. *Acta Biomaterialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.09.017>
- Frank Czerwinski, 2008. Magnesium Injection Molding. Springer US, Bolton, Ontario Canada. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-72528-4>

- Gibson, L.J., Ashby, M.F., 1999. Cellular Solids\_ Structure and Properties.
- Gomes, M.E., Sikavitsas, V.I., Behravesh, E., Reis, R.L., Mikos, A.G., 2003. Effect of flow perfusion on the osteogenic differentiation of bone marrow stromal cells cultured on starch-based three-dimensional scaffolds. *Journal of biomedical materials research. Part A*, 67 87–95. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.10075>
- Grimm, M.J., Williams, J.L., 1997. Measurements of permeability in human calcaneal trabecular bone. *Journal of Biomechanics*, 30 (7): 743–745. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(97\)00016-X](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(97)00016-X)
- Gu, X., Zheng, Y., Cheng, Y., Zhong, S., Xi, T., 2009. In vitro corrosion and biocompatibility of binary magnesium alloys. *Biomaterials*, 30 (4): 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2008.10.021>
- Gutierrez, M., Lopes, M.A., Sooraj Hussain, N., Lemos, A.F., Ferreira, J.M.F., Afonso, A., Cabral, A.T., Almeida, L., Santos, J.D., 2008. Bone ingrowth in macroporous Bonelike® for orthopaedic applications. *Acta Biomaterialia*, 4 (2): 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2007.06.009>
- Hedberg, E.L., Kroese-Deutman, H.C., Shih, C.K., Crowther, R.S., Carney, D.H., Mikos, A.G., Jansen, J.A., 2005. In vivo degradation of porous poly(propylene fumarate)/poly(DL-lactic-co- glycolic acid) composite scaffolds. *Biomaterials*. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.11.039>
- Hollinger, J.O., Einhorn, T.A., Doll, B.A., Sfeir, C., 2004. Bone tissue engineering, *Bone Tissue Engineering*.
- 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., 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)
- Hollister, S.S.J., 2005. Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature materials*, 4 (July): 518–524. <https://doi.org/10.1038/nmat1421>
- Jacobs, J.J., Skipor, a K., Patterson, L.M., Hallab, N.J., Paprosky, W.G., Black, J., Galante, J.O., 1998. Metal release in patients who have had a primary total hip arthroplasty. A prospective, controlled, longitudinal study. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 80 (10): 1447–1458.
- Jaecques, S.V.N., Van Oosterwyck, H., Muraru, L., Van Cleynenbreugel, T., De Smet, E., Wevers, M., Naert, I., Vander Sloten, J., 2004. Individualised, micro CT-based finite element modelling as a tool for biomechanical analysis related to tissue engineering of bone. *Biomaterials*, 25 (9): 1683–1696. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00516-7](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00516-7)
- Jiang, G., He, G., 2014. A new approach to the fabrication of porous magnesium with well-controlled 3D pore structure for orthopedic applications.

- Johnston, S., Shi, Z., Atrens, A., 2015. The influence of pH on the corrosion rate of high-purity Mg, AZ91 and ZE41 in bicarbonate buffered Hanks' solution. *Corrosion Science*. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.09.018>
- Keaveny, T.M., Hayes, W.C., 1993. Mechanical Properties of Cortical and Trabecular Bone. *Bone growth* (January 1993): 285–344.
- Lacroix, D., Chateau, A., Ginebra, M.P., Planell, J.A., 2006. Micro-finite element models of bone tissue-engineering scaffolds. *Biomaterials*, 27 (30): 5326–5334. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.06.009>
- 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>
- Maguire, M.E., Cowan, J.A., 2002. Magnesium chemistry and biochemistry [Review]. *BioMetals*, 15 (3): 203–210.
- Md. Saad, A.P., Abdul Rahim, R.A., Harun, M.N., Basri, H., Abdullah, J., Kadir, M.R.A., 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 & Design*. <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* 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 & 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>
- Md Saad, A.P., Prakoso, A.T., Sulong, M.A., Basri, H., Wahjuningrum, D.A., Syahrom, A., 2019. Impacts of dynamic degradation on the morphological and mechanical characterisation of porous magnesium scaffold. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. <https://doi.org/10.1007/s10237-018-01115-z>
- 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>

- 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): 1–7. <https://doi.org/10.1115/1.4028985>
- Milan, J.L., Planell, J.A., Lacroix, D., 2009. Computational modelling of the mechanical environment of osteogenesis within a polylactic acid-calcium phosphate glass scaffold. *Biomaterials*. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2009.04.026>
- Morgan, E.F., Keaveny, T.M., 2001. Dependence of yield strain of human trabecular bone on anatomic site. *Journal of Biomechanics*, 34 (5): 569–577. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(01\)00011-2](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(01)00011-2)
- Nagels, J., Stokdijk, M., Rozing, P.M., 2003. Stress shielding and bone resorption in shoulder arthroplasty. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 12 (1): 35–39. <https://doi.org/10.1067/mse.2003.22>
- Niinomi, M., 2002. Recent metallic materials for biomedical applications. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33 (3): 477–486. <https://doi.org/10.1007/s11661-002-0109-2>
- 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)
- Park, J.B., Bronzino, J.D., 2003. Biomaterials principles and application. CRC PRESS, Boca Raton.
- Pasini, D., 2011. Shape Design of Periodic Cellular Materials Under Cyclic Loading. *Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference* 1–10.
- Pellicer, E., Gonzalez, S., Blanquer, A., Surinach, S., Baro, M.D., Barrios, L., Ibanez, E., Nogues, C., Sort, J., 2013. On the biodegradability, mechanical behavior, and cytocompatibility of amorphous Mg<sub>72</sub>Zn<sub>23</sub>Ca<sub>5</sub> and crystalline Mg<sub>70</sub>Zn<sub>23</sub>Ca<sub>5</sub>Pd<sub>2</sub> alloys as temporary implant materials. *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*, 101 A (2): 502–517. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.34347>
- 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>
- Ryan, G., Pandit, A., Apatsidis, D.P., 2006. Fabrication methods of porous metals for use in orthopaedic applications. *Biomaterials*, 27. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.12.002>
- Shen, H., Brinson, L.C., 2011. A numerical investigation of porous titanium as orthopedic implant material. *Mechanics of Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2011.06.002>
- Shi, L., Shi, L., Wang, L., Duan, Y., Lei, W., Wang, Z., Li, J., Fan, X., Li, X.,



- Li, S., Guo, Z., 2013. The Improved Biological Performance of a Novel Low Elastic Modulus Implant. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055015>
- Shor, L., Güçeri, S., Chang, R., Kim, W., Lee, H., Kim, Y., n.d. regeneration Modulating mechanical behaviour of 3D-printed cartilage-mimetic PCL scaffolds : in fl uence of molecular weight and pore geometry.
- Snyder, B.D., Piazza, S., Edwards, W.T., Hayes, W.C., 1993. Role of trabecular morphology in the etiology of age-related vertebral fractures. *Calcified Tissue International*. <https://doi.org/10.1007/BF01673396>
- Staiger, M.P., Pietak, A.M., Huadmai, J., Dias, G., 2006. Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: A review. *Biomaterials*. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.10.003>
- Standard, I., 2011. ISO 13314 Mechanical testing of metals, ductility testing, compression test for porous and cellular metals. *Reference number ISO, 13314 (13314): 1–7*.
- 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>
- 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* 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9701-x>
- Syahrom, A., Abdul Kadir, M.R., Abdullah, J., Öchsner, A., 2013. Permeability studies of artificial and natural cancellous bone structures. *Medical engineering & physics*, 35 (6): 792–9. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.08.011>
- Tamburaci, S., Tihminlioglu, F., 2018. Biosilica incorporated 3D porous scaffolds for bone tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering C*. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.05.040>
- Tan, L., Gong, M., Zheng, F., Zhang, B., 2009. Study on compression behavior of porous magnesium used as bone tissue engineering scaffolds. 015016. <https://doi.org/10.1088/1748-6041/4/1/015016>
- Theerakittayakorn, K., Nanakorn, P., Sam, P., Suttakul, P., 2016. Exact forms of effective elastic properties of frame-like periodic cellular solids. *Archive of Applied Mechanics*, 86 (8): 1465–1482. <https://doi.org/10.1007/s00419-016-1129-5>
- Ushijima, K., Cantwell, W.J., Mines, R.A.W., Tsopanos, S., Smith, M., 2011. An investigation into the compressive properties of stainless steel micro-lattice structures. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 13 (3): 303–329. <https://doi.org/10.1177/1099636210380997>
- 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/matecconf/201710101009>

- Uth, N., Mueller, J., Smucker, B., Yousefi, A.M., 2017. Validation of scaffold design optimization in bone tissue engineering: Finite element modeling versus designed experiments. *Biofabrication*. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/9/1/015023>
- van Lenthe, G.H., Hagenmüller, H., Bohner, M., Hollister, S.J., Meinel, L., Müller, R., 2007. Nondestructive micro-computed tomography for biological imaging and quantification of scaffold-bone interaction in vivo. *Biomaterials*, 28 (15): 2479–2490. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.01.017>
- Wang, H., Shi, Z., 2011. In vitro biodegradation behavior of magnesium and magnesium alloy. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.31769>
- Waterlow, J.C., Garlick, P.J., D. J. Millward, 1978. Protein Turnover in Mammalian Tissues and in the Whole Body :Book Reviews. *The New England Journal of Medicine* 508.
- Williams, A.F.O., McCullough, M.B.A., 2015. Micro-computed tomography to finite element analysis of in vivo biodegradable magnesium-alloy screw and surrounding bone in rabbit femurs, in: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-52790>
- 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)
- Xia, X.C., Chen, X.W., Zhang, Z., Chen, X., Zhao, W.M., Liao, B., Hur, B., 2013. Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell Mg alloy foam. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1 (4): 330–335. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.11.006>
- Xu, Z.G., Fu, J.W., Luo, T.J., Yang, Y.S., 2012. Effects of cell size on quasi-static compressive properties of Mg alloy foams. *Materials & Design*, 34 40–44. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.066>
- Y.F. Zheng , X.N. Gu, F.W., 2014. Biodegradable Metals. *Materials Science and Engineering A*.
- Yu, C., Kikuchi, N., Hollister, S.J., 2004. A novel method for biomaterial scaffold internal architecture design to match bone elastic properties with desired porosity. 37 623–636. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2003.09.029>
- Yu, Y., Lu, H., Sun, J., 2018. Long-term in vivo evolution of high-purity Mg screw degradation — Local and systemic effects of Mg degradation

- products. *Acta Biomaterialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.02.023>
- Yusop, A.H., Bakir, A.A., Shaharom, N.A., Abdul Kadir, M.R., Hermawan, H., 2012. Porous biodegradable metals for hard tissue scaffolds: A review. *International Journal of Biomaterials*. <https://doi.org/10.1155/2012/641430>
- Zeng, R., Dietzel, W., Witte, F., Hort, N., Blawert, C., 2008. Progress and challenge for magnesium alloys as biomaterials. *Advanced Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1002/adem.200800035>
- Zhang, X., Li, X.W., Li, J.G., Sun, X.D., 2014. Preparation and mechanical property of a novel 3D porous magnesium scaffold for bone tissue engineering. *Materials Science and Engineering C*. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.05.044>
- Zhao, F., Vaughan, T.J., Mcnamara, L.M., 2015a. Multiscale fluid–structure interaction modelling to determine the mechanical stimulation of bone cells in a tissue engineered scaffold. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. <https://doi.org/10.1007/s10237-014-0599-z>
- Zhao, F., Vaughan, T.J., Mcnamara, L.M., 2015b. Multiscale fluid–structure interaction modelling to determine the mechanical stimulation of bone cells in a tissue engineered scaffold. *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*, 14 (2): 231–243. <https://doi.org/10.1007/s10237-014-0599-z>
- Zheng, Y.F., Gu, X.N., Witte, F., 2014. Biodegradable metals. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 77 1–34. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2014.01.001>
- 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>