

**TESIS**

**ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP  
PERILAKU MEKANIS DAN PERMEABILITAS PERANCAH  
*POLYLACTIC ACID (PLA)***



**IMAM AKBAR**

03032622024004

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

2021

**TESIS**

**ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP  
PERILAKU MEKANIS DAN PERMEABILITAS PERANCAH  
*POLYLACTIC ACID (PLA)***

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



**IMAM AKBAR**

03032622024004

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

**2021**

HALAMAN PENGESAHAN

**ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP  
PERILAKU MEKANIS DAN PERMEABILITAS  
PERANCAH *POLYLACTIC ACID* (PLA)**

TESIS

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

Oleh:

**IMAM AKBAR**  
**03032622024004**

Palembang, Oktober 2021

Menyetujui  
Pembimbing I



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

Pembimbing II



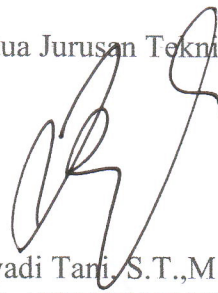
Agung Mataram ST. MT. Ph.D  
NIP. 197901052003121002

Mengetahui,  
Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Sriwijaya



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

Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

## HALAMAN PERSETUJUAN

Tesis dengan judul “ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP PERILAKU MEKANIS DAN PERMEABILITAS PERANCAH *POLYLACTIC ACID* (PLA)” telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Seminar Proposal Fakultas Teknik/Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya pada Tanggal, Oktober 2021 dan dinyatakan sah untuk melakukan penelitian lebih lanjut.

Palembang, Oktober 2021

Pembimbing:

1. Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri

NIP. 195802011984031002

2. Agung Mataram ST. MT. Ph.D

NIP. 197901052003121002



Tim Penguji Seminar Proposal:

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



Koordinator Program Studi

Magister Teknik Mesin

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

NIP. 197901052003121002



## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Imam Akbar

NIM : 03032622024004

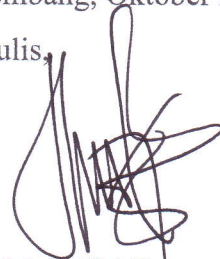
Judul : Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap Perilaku Mekanis Dan Permeabilitas Perancah Polylactic Acid (PLA).

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, Oktober 2021

Penulis,



IMAM AKBAR

NIM. 03032622024004

JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No. :  
Diterima Tanggal :  
Paraf :


TESIS

NAMA : Imam Akbar  
NIM : 03032622024004  
JURUSAN : Teknik Mesin  
BIDANG STUDI : Konstruksi  
JUDUL TESIS : Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap Perilaku  
Mekanis Dan Permeabilitas Perancah Polylactic  
Acid (PLA)  
DIBUAT TANGGAL : Agustus 2021  
SELESAI TANGGAL : Oktober 2021

Palembang, Oktober 2021

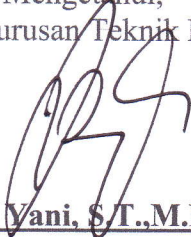
Menyetujui  
Pembimbing I

Pembimbing II

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

  
Agung Mataram ST. MT. 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 dibawah ini:

Nama : Imam Akbar

NIM : 03032622024004

Judul : Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap perilaku Mekanis Dan Permeabilitas Perancah Polylactic Acid (PLA)

Menyatakan bahwa Tesis saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim 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, Oktober 2021



[Imam Akbar]

## RINGKASAN

Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap Perilaku Mekanis Dan Permeabilitas Perancah Polylactic Acid (PLA)

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, Oktober 2021

Imam Akbar Dibimbing Oleh Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri.

*The Effect of Morphology on Mechanical Properties and Permeability Polylactic Acid (PLA) Scaffolds*

xix + 68 halaman, 10 Tabel, 35 Gambar

## RINGKASAN

Rekayasa jaringan perancah tulang dari segi fungsionalitas sebagai bantalan beban dan memfasilitasi transportasi nutrisi dan pembuangan limbah disaat implant ditanamkan. Pada penelitian ini polimer polylactide acid (PLA) dengan struktur negative schwarz p (NSP) yang memiliki kelengkungan (tortuositas) memiliki potensi yang baik sebagai perancah tulang karena PLA memiliki sifat nya yang unik serta mampu memenuhi beberapa aspek yang sesuai dengan system biologi yang kompleks pada tubuh manusia seperti *biocompatibility*, *osteo conductivity*, *non-toxic*, *biodegradable*, dan sifat mekanik yang baik. Selain itu struktur perancah NSP yang digunakan dalam penelitian ini dikembangkan menggunakan computer aided design (CAD) dan dicetak menggunakan mesin 3D printing, untuk perilaku mekanik dilakukan pengujian secara experimental serta dilanjutkan analisis CFD dan FEA untuk memperoleh nilai permeabilitas dan perilaku mekanik yang meliputi modulus elastisitas dan yield strength divalidasi dengan hasil experimental. Hasilnya menunjukkan bahwa porositas mempunyai hubungan yang kuat terhadap morfologi lain seperti Tb. Th, Tb. Sp, luas permukaan tertentu dan tortuositas selain itu porositas dan tortuositas juga mempunyai hubungan yang kuat terhadap nilai permeabilitas dimana meningkatnya porositas nilai permeabilitas akan meningkat sebaliknya meningkatnya nilai tortuositas nilai permeabilitas akan menurun mengenai perilaku mekanik modulus elastisitas dan yield strength nilai akan berkurang dengan meningkatnya porositas. Nilai permeabilitas dan perilaku mekanik perancah polylactic acid telah berada dalam rentang tulang alami manusia sehingga model yang peneliti kembangkan telah mencapai kandidat perancah implant yang baik untuk di aplikasikan dalam bidang medis.

**Kata kunci:** Perancah tulang, polylactic acid, morfologi, permeabilitas, perilaku mekanis

## SUMMARY

The Effect Morphology Scaffolds on Mechanical Properties and Permeability  
Polylactic Acid (PLA)

Scientific papers in the form of a thesis, Oktober 2021

Imam Akbar; Supervised by Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri.

Analisis Pengaruh Morfologi Terhadap Perilaku Mekanis Dan Permeabilitas  
Perancah Polylactic Acid (PLA)

xix + 68 Pages, 10 table, 35 pictures

## SUMMARY

Bone tissue Engineering scaffold in terms of load-bearing functionality and facilitating nutrient transport and waste disposal when implants are implanted. In this study, polylactide acid (PLA) polymer with a negative Schwarz p (NSP) structure which has tortuosity has good potential as a bone scaffold because PLA has unique properties and is able to fulfill several aspects that are suitable for complex biological systems in the body. human body such as biocompatibility, osteo conductivity, non-toxic, biodegradable, and good mechanical properties. In addition, the NSP scaffold structure used in this study was developed using computer aided design (CAD) and printed using a 3D printing machine, for mechanical behavior testing was carried out experimentally and continued with CFD and FEA analysis to obtain permeability values and mechanical behavior including modulus of elasticity and yield strength was validated by experimental results. The results show that porosity has a strong relationship with other morphologies such as Tb. Th, Tb. Sp, a certain surface area and tortuosity in addition to porosity and tortuosity also have a strong relationship to the permeability value where increasing the porosity of the permeability value will increase on the contrary increasing the tortuosity value of the permeability value will decrease regarding the mechanical behavior of the elastic modulus and yield strength value will decrease with increasing porosity. The permeability value and mechanical behavior of polylactic acid scaffolds are within the natural range of human bone so that the model that the researchers developed has reached a good candidate for implant scaffolds to be applied in the medical field.

**Keyword:** Bone scaffold, Polylactic acid, Morfologi, Permeability, Mechanical behavior

## 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. Keluarga Penulis, kedua Orang tua 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 PERILAKU MEKANIS DAN PERMEABILITAS PERANCAH *POLYLACTIC ACID* (PLA)” 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, Oktober 2021

Imam Akbar

## DAFTAR ISI

<b>TESIS .....</b>	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN AGENDA .....</b>	<b>v</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....</b>	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN .....</b>	<b>viii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRAC.....</b>	<b>xviii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan .....	6
1.5 Manfaat .....	6
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1 Studi literatur.....	7
2.2 Definisi Tulang.....	8
2.3 Material Berpori .....	9
2.4 Rekayasa Jaringan Perancah Tulang .....	10
2.5 PLA sebagai Material Perancah Tulang.....	11
2.6 Persyaratan Dalam Perancangan Perancah tulang .....	13
2.6.1 Microarchitecture .....	13
2.6.2 Permeabilitas .....	13
2.6.3 Tortuositas.....	15
2.6.4 Perilaku Mekanis.....	15
2.7 Teori Dasar Sifat Material.....	18
2.8 Aplikasi Metode Elemen Hingga Dalam Rekayasa Jaringan .....	21
2.8.1 <i>Computational Fluid Dynamic</i> (CFD) .....	21
2.8.2 <i>Finite Element Analysis</i> (FEA) .....	22

<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>	<b>24</b>
3.1 Pendekatan Umum .....	24
3.2 Diagram Alir Penelitian .....	25
3.3 Tahapan Penelitian .....	26
3.4 Pengumpulan Data .....	26
3.5 Pengukuran Morfologi .....	27
3.6 Fluid flow analysis .....	29
3.6.1 <i>Fluid Properties</i> .....	29
3.6.2 Penentuan kondisi batas .....	30
3.6.3 <i>Meshing</i> dan <i>running</i> .....	30
3.7 <i>Convergent Mesh</i> .....	31
3.8 Fabrikasi Perancah PLA.....	32
3.9 Material Properties <i>Polylactic acid</i> (PLA).....	34
3.10 Data Pembebanan Pengujian tekan .....	35
3.11 Pengujian Tekan PLA Berpori .....	36
3.12 Prosedur Simulasi Perilaku Mekanik .....	37
3.12.1 Penentuan material .....	37
3.12.2 Penentuan kondisi batas .....	37
3.12.3 <i>Meshing</i> .....	38
3.12.4 <i>Running</i> program.....	38
3.13 <i>Model Solver</i> .....	39
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>44</b>
4.1 Pendahuluan .....	44
4.2 Morfologi analisis .....	44
4.3 Analisis Permeabilitas .....	48
4.4 Validasi Perilaku Mekanik Perancah <i>Polylactid Acid</i> (PLA) .....	51
4.5 Analisis Perilaku Mekanik Perancah .....	53
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>57</b>
5.1 Kesimpulan .....	57
5.2 Saran.....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>58</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 State of The Art penelitian (SOTA) .....	8
Gambar 2.2 Rangka dan struktur tulang manusia .....	9
Gambar 2.3 Jenis-jenis logam berpori .....	10
Gambar 2.4 Perancah <i>polylactic acid (PLA)</i> .....	12
Gambar 2.5 Rentang permeabilitas tulang trabecular .....	14
Gambar 2.6 Definisi tortuositas .....	15
Gambar 2.7 Skematis diagram perilaku mekanis.....	16
Gambar 2.8 Kurva tegangan-regangan tulang dari .....	17
Gambar 2.9 Spesimen silinder diberi beban uniaxial compression test.....	19
Gambar 2.10 Tipikal tegangan-regangan pada tulang cortical .....	21
Gambar 2.11 Hubungan antara modulus elastisitas dan porositas.....	23
Gambar 3.1 Diagram alir Penelitian.....	25
Gambar 3.2 Skematis Diagram Proses Desain.....	26
Gambar 3.3 visualisasi morfologi perancah.....	28
Gambar 3.4 Kondisi batas simulasi.....	30
Gambar 3.5 Convergent Mesh .....	31
Gambar 3.6 Convergent mesh.....	32
Gambar 3.7 Perancah berpori Hasil pencetakan 3D printing.....	33
Gambar 3.8 Tampilan mikroskopis perancah A) Spesimen dengan porositas 25% B) Sampel dengan porositas 75% .....	34
Gambar 3.9 Pengujian tekan <i>polylactic acid (PLA)</i> solid.....	35
Gambar 3.10 Pengujian tekan perancah <i>polylactide acid</i> .....	36
Gambar 3.11 Kondisi Batas Simulasi Pengujian Tekan .....	38
Gambar 3.12 Grafik kurva tegangan-regangan perancah NSP25 .....	42
Gambar 4.1 Hubungan antara porositas terhadap Tb.Th dan Tb.Sp.....	44
Gambar 4.2 Hubungan antara porositas dan tortuositas perancah PLA.....	45
Gambar 4.3 Hubungan antara luas permukaan tertentu terhadap a. Porositas dan b. Tortuositas.....	47
Gambar 4.4 Hubungan antara porositas dan penurunan tekanan.....	47

Gambar 4.5 Hubungan antara permeabilitas terhadap a. porositas dan b. tortuositas .....	50
Gambar 4.6 Velocity streamline a. NSP25 dan b. NSP75 .....	50
Gambar 4.7 perbandingan antara permeabilitas tulang cancellous dan perancah tulang.....	51
Gambar 4.8 Stress dan Strain perancah NSP25 .....	52
Gambar 4.9 perbandingan antara modulus elastisitas FEA dan Experimental .....	52
Gambar 4.10 Hubungan antara porositas dan Modulus elastisitas .....	54
Gambar 4.11 Hubungan antara porositas dan Yield Strength.....	55
Gambar 4.12 Efektif plastic strain perancah a. NSP25 dan b. NSP.....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat mekanik pada tulang dan implant material.....	16
Tabel 3.1 parameter desain .....	27
Tabel 3.2 Morfologi perancah NSP .....	29
Tabel 3.3 Fluid Properties SBF .....	30
Tabel 3.4 Material Properties pada Polylactic Acid (PLA) Solid.....	35
Tabel 3.5 Hasil pengujian tekan berupa modulus elastisitas dan yield strength...	36
Tabel 3.6 Material Properties Solid PLA.....	37
Tabel 3.7 Raw data hasil simulasi gaya dan displacement pada perancah .....	39
Tabel 3.8 Data hasil simulasi sifat mekanis Perancah PLA berpori .....	40
Tabel 4.1 Perbandingan antara perilaku mekanik tulang trabecular alami manusi dan perancah tulang PLA berpori model NSP .....	55



## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
$\Phi$	: Porositas	%
$\tau$	: Tortuositas	$mm/mm$
$\rho$	: Densitas	$kg/m^3$
$\mu$	: Viskositas Dinamik	$Pa \cdot s$
$\Delta p$	: Penurunan Tekanan	$Pa$
$F$	: Gaya	$N$
$A$	: Luas Permukaan	$mm^2$
$\Delta l$	: Pertambahan Panjang	$Pa$
$l_0$	: Panjang Mula-Mula	$mm$
$\sigma$	: Tegangan Tekan	$MPa$
$\sigma_y$	: Tegangan Luluh	$MPa$
$\varepsilon$	: Regangan	$mm/mm$
$E$	: Modulus Elastisitas	$MPa$
$E_t$	: Tangent Modulus	$MPa$
$k$	: Permeabilitas	$m^2$
Tb.Th	: <i>Trabecular Thickness</i>	$mm$
Tb.Sp	: <i>Trabecular Separation</i>	$mm$
BS	: Bone Surface	$mm^2$
BV	: Bone Volume	$mm^3$
TV	: Total Volume	$mm^3$
BS/TV	: <i>Specific Surface Area</i>	$mm^{-1}$

**ANALISIS PENGARUH MORFOLOGI TERHADAP PERILAKU  
MEKANIS DAN PERMEABILITAS PERANCAH POLYLACTIC ACID  
(PLA)**

**Imam Akbar <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](mailto:hasan_basri@unsri.ac.id)

**Abstrak**

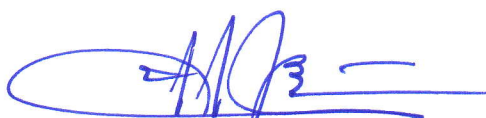
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh morfologi perancah NSP terhadap fenomena mass transport terutama permeabilitas dan perilaku mekanis biomaterial PLA. Model perancah dikembangkan menggunakan computer aided desain (CAD) dan dicetak menggunakan mesin 3D printing kemudian dilakukan pengujian secara experimental untuk mendapatkan sifat mekanik untuk kondisi batas dalam simulasi element hingga. Hasilnya menunjukkan bahwa porositas mempunyai hubungan yang kuat terhadap morfologi lain seperti Tb.Th, Tb.Sp, luas permukaan tertentu dan tortuositas selain itu porositas dan tortuositas juga mempunyai hubungan yang kuat terhadap nilai permeabilitas dimana meningkatnya porositas nilai permeabilitas akan meningkat sebaliknya meningkatnya nilai tortuositas nilai permeabilitas akan menurun dan mengenai perilaku mekanik modulus elastisitas dan yield strength nilai akan berkurang dengan meningkatnya porositas. Berdasarkan dari nilai permeabilitas dan perilaku mekanik perancah polylactic acid telah berada dalam rentang tulang alami manusia sehingga model yang peneliti kembangkan telah mencapai kandidat perancah implant yang baik untuk di aplikasikan dalam bidang medis.

**Kata kunci:** Perancah tulang, polylactic acid, morfologi, permeabilitas, perilaku mekanis

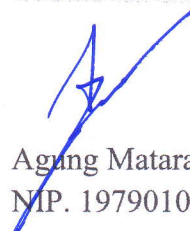
Palembang, Oktober 2021

Pembimbing I

Pembimbing II dan Ketua jurusan  
Teknik Mesin



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



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

**The Effect Morphology Scaffolds on Mechanical Behaviours and  
Permeability Polylactic Acid (PLA)**

**Imam Akbar<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](mailto:hasan_basri@unsri.ac.id)

**Abstrak**


This study aims to analyze the effect of NSP scaffold morphology on mass transport phenomena, especially the permeability and mechanical behavior of PLA biomaterials. The scaffold model was developed using computer aided desain (CAD) and printed using a 3D printing machine, then experimental testing was carried out to obtain mechanical properties for boundary conditions in finite element simulation. The results show that porosity has a strong relationship to other morphologies such as Tb.Th, Tb.Sp, a certain surface area and tortuosity. In addition, porosity and tortuosity also have a strong relationship to the permeability value, where increasing the porosity of the permeability value will increase on the contrary, the increase in the tortuosity value. the permeability will decrease and regarding the mechanical behavior the modulus of elasticity and yield strength values will decrease with increasing porosity. Based on the permeability value and mechanical behavior of the polylactic acid scaffold, it is within the natural range of human bone so that the model that the researchers developed has reached a good candidate for implant scaffold for application in the medical field.

**Kata kunci:** Bone scaffold, Polylactic acid, Morfologi, Permeability, Mechanical behaviours

Palembang, Oktober 2021

Pembimbing I

Pembimbing II dan Ketua jurusan  
Teknik Mesin



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



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

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Tulang merupakan jaringan kompleks yang secara terus-menerus melakukan renovasi biologis dinamis, proses berpasangan dimana osteoclast menyerap jaringan tulang yang matang atau rusak diikuti oleh osteoblast yang menghasilkan tulang baru untuk mempertahankan homeostasis (Reznikov, Shahar, and Weiner 2014). Namun tulang dapat menderita cacat yang berukuran kritis yang tidak mungkin diperbaiki sendiri oleh respon penyembuhan alami tubuh (Bauer and Muschler 2000). Yang dapat disebabkan oleh osteoporosis, kanker, cedera traumatis dan kekurangan nutrisi (Sarkar et al. 2006). Menanggapi hal ini rekayasa jaringan yang menggabungkan biomaterial sebagai perancah sangat diperlukan untuk mendukung atau mengembalikan fungsi mekanik pada tulang serta wadah untuk memandu pertumbuhan jaringan tulang yang baru (Dhandayuthapani et al. 2011).

Dari sudut pandang teknik, salah satu tantangan utama untuk perancah berpori adalah bagaimana memanipulasi struktur morfologi untuk mencapai perilaku mekanik yang baik sebagai persyaratan biologis untuk regenerasi jaringan tulang (Liu et al. 2018). Karena struktur tulang trabecular sangat kompleks, proses pengembangan struktur biomaterial harus dilakukan secara menyeluruh untuk mencapai karakteristik yang mendekati tulang trabecular alami dimana telah banyak literatur yang melaporkan bahwa parameter morfologi tulang trabecular mempunyai korelasi yang kuat terhadap perilaku mekaniknya seperti *volume fraction* (BV/TV), *trabecular thickness* (Tb. Th), serta *trabecular separation* (Tb. Sp) (Rincón-Kohli and Zysset 2009). Perilaku mekanis tulang trabecular khususnya modulus elastisitas sangat diperlukan sebagai panduan dalam pengembangan desain perancah. Modulus elastisitas implant harus konsisten dengan jaringan tulang tempat biomaterial implant yang akan ditanamkan

perisai stress (*stress shielding*) yang akan menyebabkan *resorpsi* pada tulang dan secara signifikan menggagalkan tujuan daripada rekayasa jaringan tersebut (Banaszkiewicz 2014). Telah banyak peneliti yang berfokus dalam menginvestigasi parameter-parameter yang secara aktif dapat mengontrol modulus elastisitas untuk dapat memberi solusi terhadap permasalahan perisai stress (*stress shielding*) tersebut. Seperti halnya (Guarino, Causa, and Ambrosio 2007). Menggunakan pendekatan experimental telah berhasil menyelidiki parameter porositas, dalam studinya menjelaskan bahwa meningkatkan porositas akan secara significant menurunkan nilai modulus elastisitas dan (Md Saad et al. 2019) juga telah berhasil menyelidiki morfologi magnesium yang telah terdegradasi terhadap perilaku mekanis, mereka menjelaskan bahwa semakin besar surface area maka modulus elastisitas akan semakin meningkat.

Mengenai perancah tulang, tidak hanya dukungan mekanis namun perancah tulang juga harus dapat memberikan jalur untuk nutrisi mencapai adhesi sel osteoblastic dan diferensiasi osteogenic ke daerah dimana pembentukan jaringan baru diinginkan (Amaral et al. 2002). Dengan kata lain, fenomena transportasi nutrisi ketika sumsum tulang melewati struktur perancah juga mempunyai peranan penting dalam area penelitian ini. Misalnya, permeabilitas merupakan nilai yang sangat penting untuk perancah berpori karena telah diketahui bahwa nilai permeabilitas sangat mempengaruhi proliferasi sel. Dalam pengembangan desain perancah tulang, tujuannya secara umum adalah untuk meniru struktur tulang trabecular yang ditemukan dalam tubuh manusia (Torres-Sanchez et al. 2017). Sebagai referensi studi permeabilitas microarchitecture tulang trabecular telah banyak diteliti melalui cara eksperimental dan simulasi komputasi salah satunya adalah yang dilakukan oleh (Nauman, Fong, and Keaveny 1999). Yang meninjau permeabilitas dari berbagai situs anatomi dan orientasi.

Studi permeabilitas perancah berpori dalam beberapa tahun, dimana parameter umum seperti porositas, luas permukaan, ukuran pori, bentuk pori, bentuk struktur seperti *Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)*, struktur *lattice* dan sifat permukaan lainnya, merupakan pendekatan penelitian yang baik dalam pengembangan desain tulang buatan untuk mencapai permeabilitas yang baik. Namun, tulang trabecular memiliki struktur yang sangat kompleks yang

membentuk jaringan yang bukan kisi atau berupa garis lurus sebagai rangka, sebaliknya alam memilih desain struktur berliku-liku yang menghadirkan jaringan tulang yang sangat terkoneksi dengan aspek batang dan pelat, morfologi ini masih kurang dipahami oleh sebab itu, sangat diperlukan untuk menentukan sejumlah parameter untuk menggambarkan kompleksitas tulang trabecular ini. Dalam penelitian ini, peneliti berfokus pada parameter seperti itu yang disebut tortuositas dan istilah tortuositas adalah cerminan kompleksitas arsitektur perancah yang mengacu pada panjang jalur yang melengkung yang akan dilalui fluida melalui pori-pori yang saling terhubung untuk dibagi dengan jarak garis lurus. Berdasarkan fenomena jaringan pori pada struktur tulang trabecular yang sangat kompleks, dimana tortuositas mempunyai fungsi yang sangat fundamental dalam mengatur sirkulasi darah (Roque and Wolf 2014). Namun, beberapa tahun terakhir, hanya ada sedikit penelitian yang diketahui dalam meninjau dampak morfologi tortuositas pada fenomena transportasi nutrisi. Sejumlah penelitian lebih banyak menyelidiki factor-faktor umum yang secara efektif mengontrol sifat transportasi nutrisi dengan memanipulasi struktur morfologi internal perancah yang meliputi porositas. Seperti halnya pada penelitian sebelumnya (Imam et al. 2021) yang sedang dalam proses publikasi telah berhasil melihat pengaruh porositas dan ukuran pori terhadap permeabilitas perancah functionally graded scaffold (FGS) menggunakan simulasi komputasi, Dari hasil tersebut, permeabilitas meningkat dengan meningkatnya porositas dan ukuran pori. Selanjutnya, (Syahrom et al. 2013) juga menyebutkan bahwa permeabilitas perancah akan meningkat dengan meningkatnya porositas akan tetapi menurun dengan bertambahnya luas permukaan.

Menanggapi parameter tortuositas ini para peneliti setuju dengan penyebutan sebelumnya bahwa tortuositas dalam perancah sangat penting untuk dieksplorasi lebih dalam karena efek dari tortuositas ini secara nyata akan memberikan hambatan terhadap laju aliran fluida yang melalui perancah (Pennella et al. 2013). Namun, perlu digaris bawahi hambatan dalam hal ini merupakan potensi kerugian atau keuntungan masih sangat ambigu dan masih perlu dieksplorasi lebih dalam, namun peneliti berhipotesis bahwa model perancah yang peneliti kembangkan dengan jalur fluida yang berliku-liku akan menghasilkan peningkatan terhadap tekanan fluida dimana menurut hukum Darcy's tekanan yang



tinggi akan sangat identik dengan nilai permeabilitas yang rendah (Innocentini et al. 2010) dan tortuositas ini juga berpotensi dapat meningkatkan luas permukaan tertentu (*specific surface area*) perancah. Mungkin pendapat ini sangat bertentangan dengan studi-studi lain yang mengatakan bahwa permeabilitas yang tinggi sangat di perlukan dalam rekayasa jaringan. Namun faktanya adalah (Zadpoor 2015) dalam studinya menjelaskan bahwa pembentukan jaringan tulang akan jauh lebih meningkat pada area permukaan yang melengkung dan cekung dibandingkan dengan permukaan cembung dan planar. Sehingga pengembangan desain perancah memberikan tantangan yang cukup untuk bagaimana memanfaatkan potensi desain dalam mengembangkan perancah yang mempunyai jalur yang sangat berliku akan tetapi tetap memberikan permeabilitas pada rentang tulang alami manusia. selain itu diketahui bahwa porositas mempunyai korelasi yang kuat terhadap tortuositas dimana meningkatkan porositas dapat mengurangi nilai dari tortuositas. Namun peneliti beranggapan bahwa parameter tortuositas terutama pada desain yang peneliti kembangkan tidak sepenuhnya bergantung pada porositas dengan kata lain, tortuositas adalah parameter yang dapat berdiri sendiri. Mungkin hal ini dapat menjadi pedoman pada penelitian di masa depan untuk pengembangan desain perancah yang lebih optimal.

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan pengembangan desain perancah terbaru dengan model pori terbuka yang berbasis kelengkungan untuk merepresentasikan kompleksitas tulang alami manusia yang peneliti sebut struktur negative schwarz-p dengan biomaterial polimer *polylactic acid* (PLA) dimana PLA ini memiliki sifatnya yang unik serta mampu memenuhi beberapa aspek yang sesuai dengan sistem biologi yang kompleks pada tubuh manusia seperti *biocompatibility*, *osteo conductivity*, *non-toxic*, *biodegradable*, dan sifat mekanik yang baik.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Pengembangan desain perancah dengan biomaterial polimer untuk rekayasa jaringan mengharuskan biomaterial perancah memiliki perilaku mekanik yang konsisten dengan tulang inang tempat dimana perancah akan ditanamkan agar

terhindar dari efek *stress shielding* yang dapat menyebabkan resorpsi pada tulang. Namun selain itu perancah juga harus dapat memfasilitasi transportasi nutrisi dan oksigen dengan kata lain yaitu nilai permeabilitas dalam rentang tulang alami manusia agar dapat memberikan efek perbaikan tulang yang baik. Oleh sebab itu peneliti mengkaji pengaruh morfologi perancah polylactide acid yang peneliti kembangkan yang meliputi porositas, *trabecular thickness* (Tb.Th), *trabecular separation* (Tb.Sp), dan tortuositas yang merepresentasikan kompleksitas tulang alami manusia terhadap fenomena transportasi nutrisi (permeabilitas) dan perilaku mekanik (modulus elastisitas).

### 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. Pemodelan perancah tulang menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*.
2. Material yang digunakan pada perancah merupakan material *polylactic acid* (PLA).
3. perangkat lunak yang digunakan dalam menganalisis sifat mekanik dan transportasi massa menggunakan COMSOL *Multiphysics* ® Software Burlington, USA dengan *Finite element Analysis* (FEA) dan *Computational Fluid Dynamic* (CFD).
4. Dalam penelitian ini nilai modulus elastisitas didapat dari data mentah hasil simulasi yang berupa stress dan strain.
5. Dalam penelitian ini morfologi di analisis menggunakan perangkat lunak *FIJI image J* plugins *bone j* dan MATLAB plugins *TauFactor*.
6. Menjadikan gambar 3D menjadi potongan-potongan gambar 2D menggunakan perangkat lunak *ChiTuBox*.
7. Dalam penelitian ini terdapat 5 variasi porositas 25%, 45%, 50%, 60% dan 75%.

## 1.4 Tujuan

Tujuan dari pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh morfologi yang dapat dikontrol yang meliputi porositas terhadap morfologi lain seperti Tb.Th, Tb.Sp, luas permukaan tertentu dan tortuositas.
2. Menganalisis pengaruh morfologi porositas dan tortuositas terhadap fenomena transportasi nutrisi yang meliputi permeabilitas
3. Menganalisis pengaruh morfologi porositas terhadap perilaku mekanis perancah *polylactic acid* (PLA) yang meliputi modulus elastisitas dan *yield strength*

## 1.5 Manfaat

1. Wujud kontribusi dalam pengembangan ilmu biomechanical di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
2. Dapat memberikan wawasan secara universal serta mendasar tentang pengujian tekan tanpa menghancurkan spesimen yang menggunakan Finite Element Analysis (FEA), serta Computational Fluid Dynamic (CFD).
3. Riset tentang analisis perilaku mekanis serta permeabilitas pada perancah PLA dapat mengkarakterisasikan variasi geometri model yang terbaik untuk implant perancah tulang.
4. Dapat dijadikan sebagai pedoman untuk riset selanjutnya dalam pengembangan desain perancah tulang.

## DAFTAR PUSTAKA

- Amaral, M., M. A. Costa, M. A. Lopes, R. F. Silva, J. D. Santos, and M. H. Fernandes. 2002. "Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Bioglass Composites Stimulate the Proliferation of MG63 Osteoblast-like Cells and Support the Osteogenic Differentiation of Human Bone Marrow Cells." *Biomaterials* 23 (24): 4897–4906. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00249-1](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00249-1).
- Ashby, MF, A Evans, NA Fleck, LJ Gibson, JW Hutchinson, HNG Wadley, and F Delale,. 2001. "Metal Foams: A Design Guide." *Applied Mechanics Reviews*. <https://doi.org/10.1115/1.1421119>.
- Astm. 1991. "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Cellular Plastics." *ASTM Standards D*: 1621–73.
- ASTM D695. 2015. "ASTM D695 – 15: Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics 1 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics." *American Society for Testing and Materials*, no. July: 19428–2959. <https://doi.org/10.1520/D0695-15>.
- Bael, S. Van, Y. C. Chai, S. Truscello, M. Moesen, G. Kerckhofs, H. Van Oosterwyck, J. P. Kruth, and J. Schrooten. 2012. "The Effect of Pore Geometry on the in Vitro Biological Behavior of Human Periosteum-Derived Cells Seeded on Selective Laser-Melted Ti6Al4V Bone Scaffolds." *Acta Biomaterialia* 8 (7): 2824–34. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.04.001>.
- Banaszkiewicz, Paul A. 2014. "Porous-Coated Hip Replacement. The Factors Governing Bone Ingrowth, Stress Shielding, and Clinical Results." *Classic Papers in Orthopaedics* 69 (1): 51–55. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5451-8_12).
- Basri, Hasan, Akbar Teguh Prakoso, Mohd Ayub Sulong, Amir Putra Md Saad, Muhammad Hanif Ramlee, Dian Agustin Wahjuningrum, Susan Sipaun, Andreas Öchsner, and Ardiyansyah Syahrom. 2020. "Mechanical Degradation Model of Porous Magnesium Scaffolds under Dynamic Immersion." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 234 (1): 175–85.

- <https://doi.org/10.1177/1464420719881736>. Bauer, Thomas W., and George F. Muschler. 2000. "Bone Graft Materials: An Overview of the Basic Science." *Clinical Orthopaedics and Related Research*, no. 371: 10–27. <https://doi.org/10.1097/00003086-200002000-00003>.
- Bianchi, Michele, Eva R. Urquia Edreira, Joop G.C. Wolke, Zeinab T. Birgani, Pamela Habibovic, John A. Jansen, Anna Tampieri, Maurilio Marcacci, Sander C.G. Leeuwenburgh, and Jeroen J.J.P. Van Den Beucken. 2014. "Substrate Geometry Directs the in Vitro Mineralization of Calcium Phosphate Ceramics." *Acta Biomaterialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.10.026>.
- Bobbert, F S L, and A A Zadpoor. 2017. "Effects of Bone Substitute Architecture and Surface Properties on Cell Response, Angiogenesis, and Structure of New Bone." *Journal of Materials Chemistry B*. <https://doi.org/10.1039/c7tb00741h>.
- Bose, Susmita, Mangal Roy, and Amit Bandyopadhyay. 2012. "Recent Advances in Bone Tissue Engineering Scaffolds." *Trends in Biotechnology* 30 (10): 546–54. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.07.005>.
- Chen, Ying, Shaoxiang Zhang, Jianan Li, Yang Song, Changli Zhao, and Xiaonong Zhang. 2010. "Dynamic Degradation Behavior of MgZn Alloy in Circulating M-SBF." *Materials Letters* 64 (18): 1996–99. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2010.06.011>.
- Chen, Yun, Arthur F.T. Mak, Min Wang, Jiashen Li, and M. S. Wong. 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): 575–80. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.005>.
- Clarke, Bart. 2008. "Normal Bone Anatomy and Physiology." *Clinical Journal of the American Society of Nephrology: CJASN* 3 Suppl 3: 131–39. <https://doi.org/10.2215/CJN.04151206>.
- Cordonnier, Thomas, Jérôme Sohier, Philippe Rosset, and Pierre Layrolle. 2011. "Biomimetic Materials for Bone Tissue Engineering - State of the Art and Future Trends." *Advanced Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1002/adem.201080098>.

- Dehority, Walter, Bernard P. Halloran, Daniel D. Bikle, Tracy Curren, Paul J. Kostenuik, Thomas J. Wronski, Ying Shen, Brian Rabkin, Abderrahman Bouraoui, and Emily Morey-Holton. 1999. "Bone and Hormonal Changes Induced by Skeletal Unloading in the Mature Male Rat." *American Journal of Physiology - Endocrinology and Metabolism* 276 (1): 39-1. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1999.276.1.e62>.
- Dhandayuthapani, Brahatheeswaran, Yasuhiko Yoshida, Toru Maekawa, and D. Sakthi Kumar. 2011. "Polymeric Scaffolds in Tissue Engineering Application: A Review." *International Journal of Polymer Science* 2011 (ii). <https://doi.org/10.1155/2011/290602>.
- Djidi, Dalila, Nathalie Mignard, and Mohamed Taha. 2015. "Thermosensitive Polylactic-Acid-Based Networks." *Industrial Crops and Products* 72: 220–30. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.09.035>.
- Dougherty, R, and K-H Kunzelmann. 2007. "Computing Local Thickness of 3D Structures with ImageJ." *Microscopy and Microanalysis* 13 (S02): 1678–79. <https://doi.org/10.1017/s1431927607074430>.
- Endo, Kaori, Satoshi Yamada, Masahiro Todoh, Masahiko Takahata, Norimasa Iwasaki, and Shigeru Tadano. 2016. "Structural Strength of Cancellous Specimens from Bovine Femur under Cyclic Compression." *PeerJ* 2016 (1): 1–15. <https://doi.org/10.7717/peerj.1562>.
- Evju, Øyvind, and Kent Andre Mardal. 2015. "On the Assumption of Laminar Flow in Physiological Flows: Cerebral Aneurysms as an Illustrative Example." *Modeling, Simulation and Applications* 14 (1): 177–95. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05230-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05230-4_7).
- Fan, Jie, Xiaoling Jia, Yan Huang, Bingmei M. Fu, and Yubo Fan. 2015. "Greater Scaffold Permeability Promotes Growth of Osteoblastic Cells in a Perfused Bioreactor." *Journal of Tissue Engineering and Regenerative Medicine*. <https://doi.org/10.1002/term.1701>.
- Farah, Shady, Daniel G. Anderson, and Robert Langer. 2016. "Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review." *Advanced Drug Delivery Reviews* 107: 367–92. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>.

- Frost, H. M. 1987. "Bone 'Mass' and the 'Mechanostat': A Proposal." *The Anatomical Record* 219 (1): 1–9. <https://doi.org/10.1002/ar.1092190104>.
- Gartner, Leslie P., and James L. Hiatt. 2014. *Color Atlas and Text of Histology-Sixth Edition*. Lippinot Williams and Wilkins.
- Gibson, L.J., and M F Ashby. 1999. "Cellular Solids\_ Structure and Properties."
- Gruber, Patrick R. 2001. *Commodity Polymers from Renewable Resources: Polylactic Acid. Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology: A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable*.
- Guarino, Vincenzo, F. Causa, and L. Ambrosio. 2007. "Porosity and Mechanical Properties Relationship in PCL Porous Scaffolds." *Journal of Applied Biomaterials and Biomechanics* 5 (3): 149–57. <https://doi.org/10.1177/228080000700500303>.
- Guérard, S., Y. Chevalier, H. Moreschi, M. Defontaine, S. Callé, and D. Mitton. 2011. "Young's Modulus Repeatability Assessment Using Cycling Compression Loading on Cancellous Bone." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine* 225 (11): 1113–17. <https://doi.org/10.1177/0954411911416858>.
- Gupta, Bhuvanesh, Nilesh Revagade, and Jöns Hilborn. 2007. "Poly(Lactic Acid) Fiber: An Overview." *Progress in Polymer Science (Oxford)*. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.01.005>.
- Haghshenas, Meysam. 2017. "Mechanical Characteristics of Biodegradable Magnesium Matrix Composites: A Review." *Journal of Magnesium and Alloys* 5 (2): 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2017.05.001>.
- Hollinger, Jeffrey O., Thomas A. Einhorn, Bruce A. Doll, and Charles Sfeir. 2004. *Bone Tissue Engineering. Bone Tissue Engineering*.
- Hollister, S J, R D Maddox, and J M Taboas. 2002. "Optimal Design and Fabrication of Scaffolds to Mimic Tissue Properties." *Biomaterials* 23: 4095–4103.
- Hollister, SJ Scott J. 2005. "Porous Scaffold Design for Tissue Engineering." *Nature Materials* 4 (July): 518–24. <https://doi.org/10.1038/nmat1421>.
- Imam Akbar 2021" Permeability Study of Functionally Graded Scaffold Based on

Morphology of Cancellous Bone” which will be published on Imeditec Prosiding

- Innocentini, M. D.M., L. P. Lefebvre, R. V. Meloni, and E. Baril. 2010. “Influence of Sample Thickness and Measurement Set-up on the Experimental Evaluation of Permeability of Metallic Foams.” *Journal of Porous Materials* 17 (4): 491–99. <https://doi.org/10.1007/s10934-009-9312-5>.
- Jaecques, S. V.N., H. Van Oosterwyck, L. Muraru, T. Van Cleynenbreugel, E. De Smet, M. Wevers, I. Naert, and J. Vander Sloten. 2004. “Individualised, Micro CT-Based Finite Element Modelling as a Tool for Biomechanical Analysis Related to Tissue Engineering of Bone.” *Biomaterials* 25 (9): 1683–96. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00516-7](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00516-7).
- Jiang, Guofeng, and Guo He. 2014. “A New Approach to the Fabrication of Porous Magnesium with Well-Controlled 3D Pore Structure for Orthopedic Applications.” *Materials Science and Engineering C*. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.07.033>.
- Kapfer, Sebastian C., Stephen T. Hyde, Klaus Mecke, Christoph H. Arns, and Gerd E. Schröder-Turk. 2011. “Minimal Surface Scaffold Designs for Tissue Engineering.” *Biomaterials*. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2011.06.012>.
- Karande, Tejas S., Joo L. Ong, and C. Mauli Agrawal. 2004. “Diffusion in Musculoskeletal Tissue Engineering Scaffolds: Design Issues Related to Porosity, Permeability, Architecture, and Nutrient Mixing.” *Annals of Biomedical Engineering* 32 (12): 1728–43. <https://doi.org/10.1007/s10439-004-7825-2>.
- Karimipour-Fard, Pedram, Amir H. Behraves, Holly Jones-Taggart, Remon Pop-Iliev, and Ghaus Rizvi. 2020. “Effects of Design, Porosity and Biodegradation on Mechanical and Morphological Properties of Additive-Manufactured Triply Periodic Minimal Surface Scaffolds.” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 112 (August): 104064. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104064>.
- Keaveny, T M, and W C Hayes. 1993. “Mechanical Properties of Cortical and Trabecular Bone.” *Bone*.



- Kruger, Thomas E., Andrew H. Miller, and Jinxi Wang. 2013. "Collagen Scaffolds in Bone Sialoprotein-Mediated Bone Regeneration." *The Scientific World Journal* 2013 (I). <https://doi.org/10.1155/2013/812718>.
- Lacroix, Damien, Arnaud Chateau, Maria Pau Ginebra, and Josep A. Planell. 2006. "Micro-Finite Element Models of Bone Tissue-Engineering Scaffolds." *Biomaterials* 27 (30): 5326–34. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.06.009>.
- Lacroix, Damien, Josep A. Planell, and Patrick J. Prendergast. 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>.
- Lee, Min, Benjamin M. Wu, and James C.Y. Dunn. 2008. "Effect of Scaffold Architecture and Pore Size on Smooth Muscle Cell Growth." *Journal of Biomedical Materials Research - Part A*. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.31816>.
- Lenthe, G. Harry van, Henri Hagenmüller, Marc Bohner, Scott J. Hollister, Lorenz Meinel, and Ralph Müller. 2007. "Nondestructive Micro-Computed Tomography for Biological Imaging and Quantification of Scaffold-Bone Interaction in Vivo." *Biomaterials* 28 (15): 2479–90. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.01.017>.
- Lerebours, C, C D L Thomas, J G Clement, P R Buenzli, and P Pivonka. 2015. "The Relationship between Porosity and Specific Surface in Human Cortical Bone Is Subject Specific" 72: 109–17. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2014.11.016>.
- Lipowiecki, Marcin, Markéta Ryvolová, Ákos Töttösi, Niels Kolmer, Sumsun Naher, Stephen A. Brennan, Mercedes Vázquez, and Dermot Brabazon. 2014. "Permeability of Rapid Prototyped Artificial Bone Scaffold Structures." *Journal of Biomedical Materials Research - Part A* 102 (11): 4127–35. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35084>.
- Liu, Fei, Zhongfa Mao, Peng Zhang, David Z. Zhang, Junjie Jiang, and Zhibo Ma. 2018. "Functionally Graded Porous Scaffolds in Multiple Patterns: New Design Method, Physical and Mechanical Properties." *Materials and Design*

- 160: 849–60. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.09.053>.
- Lu, Yongtao, Liang Liang Cheng, Zhuoyue Yang, Junyan Li, and Hanxing Zhu. 2020. “Relationship between the Morphological, Mechanical and Permeability Properties of Porous Bone Scaffolds and the Underlying Microstructure.” *PLoS ONE* 15 (9 September): 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0238471>.
- Ma, Shuai, Qian Tang, Xiaoxiao Han, Qixiang Feng, Jun Song, Rossitza Setchi, Ying Liu, et al. 2020. “Manufacturability, Mechanical Properties, Mass-Transport Properties and Biocompatibility of Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) Porous Scaffolds Fabricated by Selective Laser Melting.” *Materials and Design* 195: 109034. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109034>.
- Martin, R. Bruce. 1984. “Porosity and Specific Surface of Bone.” *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 10 (3): 179–222. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6368124>.
- Md Saad, Amir Putra, Rabiatal Adibah Abdul Rahim, Muhamad Noor Harun, Hasan Basri, Jaafar Abdullah, Mohammed Rafiq Abdul Kadir, and Ardiyansyah Syahrom. 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: 268–79. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.029>.
- Md Saad, Amir Putra, Akbar Teguh Prakoso, M. A. Sulong, Hasan Basri, Dian Agustin Wahjuningrum, and Ardiyansyah Syahrom. 2019. “Impacts of Dynamic Degradation on the Morphological and Mechanical Characterisation of Porous Magnesium Scaffold.” *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 18 (3): 797–811. <https://doi.org/10.1007/s10237-018-01115-z>.
- Mitsak, Anna G., Jessica M. Kemppainen, Matthew T. Harris, and Scott J. Hollister. 2011. “Effect of Polycaprolactone Scaffold Permeability on Bone Regeneration in Vivo.” *Tissue Engineering - Part A* 17 (13–14): 1831–39. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2010.0560>.
- Nauman, E. A., K. E. Fong, and T. M. Keaveny. 1999. “Dependence of Intertrabecular Permeability on Flow Direction and Anatomic Site.” *Annals of*

- Biomedical Engineering* 27 (4): 517–24. <https://doi.org/10.1114/1.195>.
- Pasini, Damiano. 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.
- Pawar, Rajendra P, Sunil U Tekale, Suresh U Shisodia, Jalinder T Totre, and Abraham J Domb. 2014. “Send Orders for Reprints to Reprints@benthamscience.Net Biomedical Applications of Poly(Lactic Acid).” *Recent Patents on Regenerative Medicine* 4: 40–51. <https://www.ingentaconnect.com/contentone/ben/rpgm/2014/00000004/00000001/art00004?crawler=true>.
- Pennella, F., G. Cerino, D. Massai, D. Gallo, G. Falvo D’Urso Labate, A. Schiavi, M. A. Deriu, A. Audenino, and Umberto Morbiducci. 2013. “A Survey of Methods for the Evaluation of Tissue Engineering Scaffold Permeability.” *Annals of Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10439-013-0815-5>.
- Perez, Roman A., and Gemma Mestres. 2016. “Role of Pore Size and Morphology in Musculo-Skeletal Tissue Regeneration.” *Materials Science and Engineering C* 61: 922–39. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.12.087>.
- Raheem, Zainab. 2019. “Designation : D695 – 15 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics 1 Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics 1,” no. July. <https://doi.org/10.1520/D0695-15>.
- Reznikov, Natalie, Ron Shahar, and Steve Weiner. 2014. “Bone Hierarchical Structure in Three Dimensions.” *Acta Biomaterialia* 10 (9): 3815–26. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.05.024>.
- Rincón-Kohli, Liliana, and Philippe K. Zysset. 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>.
- Roque, Waldir L, and Fabiano G Wolf. 2014. “Computing the Tortuosity of Cancellous Bone Cavity Network through Fluid Velocity Field,” 1–4.
- Rubin, J., X. Fan, D. M. Biskobing, W. R. Taylor, and T. C. Rubin. 1999.

- “Osteoclastogenesis Is Repressed by Mechanical Strain in an In Vitro Model.” *Journal of Orthopaedic Research* 17 (5): 639–45. <https://doi.org/10.1002/jor.1100170504>.
- Rumpler, Monika, Alexander Woesz, John W.C. Dunlop, Joost T. Van Dongen, and Peter Fratzl. 2008. “The Effect of Geometry on Three-Dimensional Tissue Growth.” *Journal of the Royal Society Interface* 5 (27): 1173–80. <https://doi.org/10.1098/rsif.2008.0064>.
- Samavedi, Satyavrata, Abby R. Whittington, and Aaron S. Goldstein. 2013. “Calcium Phosphate Ceramics in Bone Tissue Engineering: A Review of Properties and Their Influence on Cell Behavior.” *Acta Biomaterialia*. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.06.014>.
- Sander, Edward A., and Eric A. Nauman. 2003. “Permeability of Musculoskeletal Tissues and Scaffolding Materials: Experimental Results and Theoretical Predictions.” *Critical Reviews in Biomedical Engineering*. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.v31.i12.10>.
- Sarkar, Michael R., Peter Augat, Sandra J. Shefelbine, Sandra Schorlemmer, Markus Huber-Lang, Lutz Claes, Lothar Kinzl, and Anita Ignatius. 2006. “Bone Formation in a Long Bone Defect Model Using a Platelet-Rich Plasma-Loaded Collagen Scaffold.” *Biomaterials* 27 (9): 1817–23. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.10.039>.
- Senatov, F. S., K. V. Niaza, M. Yu Zadorozhnyy, A. V. Maksimkin, S. D. Kaloshkin, and Y. Z. Estrin. 2016. “Mechanical Properties and Shape Memory Effect of 3D-Printed PLA-Based Porous Scaffolds.” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.11.036>.
- Sultana, Naznin. 2013. *Biodegradable PHBV Polymer-Based Scaffolds for Bone Tissue Engineering. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34802-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34802-0_3).
- Syahrom, Ardiyansyah, Mohammed Rafiq Abdul Kadir, Jaafar Abdullah, and Andreas Öchsner. 2013. “Permeability Studies of Artificial and Natural Cancellous Bone Structures.” *Medical Engineering and Physics* 35 (6): 792–99. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2012.08.011>.

- Syahrom, Ardiyansyah, Mohammed Rafiq Abdul Kadir, Muhamad Nor Harun, and Andreas Öchsner. 2015. "Permeability Study of Cancellous Bone and Its Idealised Structures." *Medical Engineering and Physics* 37 (1): 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2014.11.001>.
- Torres-Sanchez, C., F. R.A. Al Mushref, M. Norrito, K. Yendall, Y. Liu, and P. P. Conway. 2017. "The Effect of Pore Size and Porosity on Mechanical Properties and Biological Response of Porous Titanium Scaffolds." *Materials Science and Engineering C* 77: 219–28. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.249>.
- Trigueiros, Paulo, Fernando Ribeiro, and Luís Paulo Reis. 2015. "Developments in Medical Image Processing and Computational Vision." *Lecture Notes in Computational Vision and Biomechanics* 19: 355–77. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13407-9>.
- Truscello, S., G. Kerckhofs, S. Van Bael, G. Pyka, J. Schrooten, and H. Van Oosterwyck. 2012. "Prediction of Permeability of Regular Scaffolds for Skeletal Tissue Engineering: A Combined Computational and Experimental Study." *Acta Biomaterialia* 8 (4): 1648–58. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.12.021>.
- Vossenbergh, Petra, G. A. Higuera, G. Van Straten, C. A. Van Blitterswijk, and A. J.B. Van Boxtel. 2009. "Darcian Permeability Constant as Indicator for Shear Stresses in Regular Scaffold Systems for Tissue Engineering." *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology* 8 (6): 499–507. <https://doi.org/10.1007/s10237-009-0153-6>.
- Woodruff, Maria A., Claudia Lange, Johannes Reichert, Arne Berner, Fulei Chen, Peter Fratzl, Jan Thorsten Schantz, and Dietmar W. Hutmacher. 2012. "Bone Tissue Engineering: From Bench to Bedside." *Materials Today* 15 (10): 430–35. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(12\)70194-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(12)70194-3).
- Xiao, Dongming, Yongqiang Yang, Xubin Su, Di Wang, and Jianfeng Sun. 2013. "An Integrated Approach of Topology Optimized Design and Selective Laser Melting Process for Titanium Implants Materials." *Bio-Medical Materials and Engineering*. <https://doi.org/10.3233/BME-130765>.
- Yu, Cheng, Noboru Kikuchi, and Scott J Hollister. 2004. "A Novel Method for

- Biomaterial Scaffold Internal Architecture Design to Match Bone Elastic Properties with Desired Porosity” 37: 623–36.  
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2003.09.029>.
- Zadpoor, Amir A. 2015. “Bone Tissue Regeneration: The Role of Scaffold Geometry.” *Biomaterials Science* 3 (2): 231–45.  
<https://doi.org/10.1039/c4bm00291a>.
- Zhao, Hongxia, Lihua Li, Shan Ding, Chenxing Liu, and Jiaoyan Ai. 2018. “Effect of Porous Structure and Pore Size on Mechanical Strength of 3D-Printed Comby Scaffolds.” *Materials Letters* 223: 21–24.  
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.03.205>.
- Zhu, X. D., H. S. Fan, Y. M. Xiao, D. X. Li, H. J. Zhang, T. Luxbacher, and X. D. Zhang. 2009. “Effect of Surface Structure on Protein Adsorption to Biphasic Calcium-Phosphate Ceramics in Vitro and in Vivo.” *Acta Biomaterialia* 5: 1311–8. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.11.024>