

SKRIPSI

**STUDI PENGARUH PENIRUAN MORFOLOGI
TULANG KANSELUS UNTUK SKAFOLD JENIS
STRUKTUR TERDEGRADASI TAKFUNGSIONAL
BERBAHAN BESI MURNI TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA**



**MUHAMMAD SOFYAN SINAGA
03051381621068**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2020**

SKRIPSI

**STUDI PENGARUH PENIRUAN MORFOLOGI
TULANG KANSELUS UNTUK SKAFOLD JENIS
STRUKTUR TERDEGRADASI TAKFUNGSIONAL
BERBAHAN BESI MURNI TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA**

**Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Mendapatkan Gelar
Sarjana Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas
Sriwijaya**



**OLEH:
MUHAMMAD SOFYAN SINAGA
03051381621068**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2020**

HALAMAN PENGESAHAN

STUDI PENGARUH PENIRUAN MORFOLOGI TULANG KANSELUS UNTUK SKAFOLD JENIS STRUKTUR TERDEGRADASI TAKFUNGSIONAL BERBAHAN BESI MURNI TERHADAP KARAKTERISTIK ALIAN FLUIDA

SKRIPSI

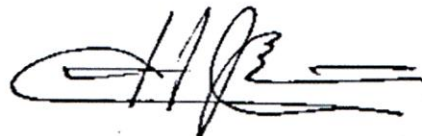
Diajukan untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar sarjana Teknik Mesin
Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Oleh:

MUHAMMAD SOFYAN SINAGA
03051381621068


Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin
Irsyadi Yani S.T, M.Eng, Ph.D
NIP. 197112251997021001

Palembang, 23 Desember 2020
Pembimbing,



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

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No. :
Diterima Tanggal :
Paraf :

SKRIPSI

Nama : MUHAMAD SOFYAN SINAGA
NIM : 03051381621068
Jurusan : TEKNIK MESIN
**Judul Skripsi : STUDI PENGARUH PENIRUAN MORFOLOGI
TULANG KANSELUS UNTUK SKAFOLD JENIS
STRUKTUR TERDEGRADASI TAKFUNGSIONAL
BERBAHAN BESI MURNI TERHADAP
KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA**
Dibuat Tanggal : JULI 2019
Selesai Tanggal : DESEMBER 2019

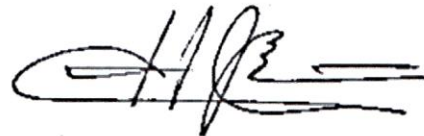
Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

Palembang, Desember 2020

Diperiksa dan disetujui oleh:
Pembimbing



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

HALAMAN PERSETUJUAN

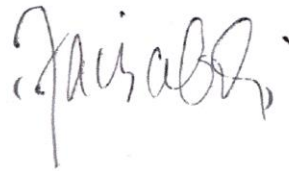
Karya Tulis Ilmiah berupa skripsi ini dengan judul “**Studi Pengaruh Peniruan Morfologi Tulang Karsinoma Untuk Skafold Jenis Struktur Terdegradasi Takfungsional Berbahan Besi Murni Terhadap Karakteristik Aliran Fluida**” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada Tanggal 23 Desember 2020.

Palembang, 23 Desember 2020

Tim penguji karya tulis ilmiah berupa Skripsi

Ketua

1. Ir. Zainal Abidin, M.T.
NIP. 195809101986021001



Anggota

2. Muhammad Yanis S.T., M.T.
NIP. 197002281994121001

()

Anggota

3. Dr. Dendy Adanta, S.Pd., M.T.
NIP. 1993060520190310163

()



Ketua Jurusan Teknik Mesin

Irsyadi Yani, ST, M.Eng, Ph.D
NIP.19712251997021001

Pembimbing



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

KATA PENGANTAR

Skripsi yang berjudul “Studi Pengaruh Peniruan Morfologi Tulang Karsinoma Untuk Skafold Jenis Struktur Terdegradasi Takfungsional Berbahan Besi Murni Terhadap Karakteristik Aliran Fluida”, disusun untuk melengkapi salah satu syarat mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Pada kesempatan ini dengan setulus hati penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang tak terhingga atas segala bimbingan dan bantuan yang telah diberikan dalam penyusunan tugas akhir ini kepada:

1. Irsyadi Yani, S.T, M.Eng, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.
2. Amir Arifin, S.T, M.Eng, Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.
3. Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri sebagai Dosen Pembimbing Skripsi yang telah banyak sekali memberikan arahan dan saran dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Seluruh Dosen Teknik Mesin Universitas Sriwijaya untuk segala ilmu yang sangat bernilai bagi penulis.
5. Seluruh Keluarga Besar penulis, Kekasih dan Teman-teman yang telah membantu dalam pengerjaan skripsi ini dan memberikan saran.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak sekali kekurangan karena keterbatasan ilmu yang penulis miliki. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun untuk kelanjutan skripsi ini ke depannya akan sangat membantu.

Akhir kata penulis berharap semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan di masa yang akan datang di kemudian hari.

Palembang, 23 Desember 2020



Muhammad Sofyan Sinaga

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhamad Sofyan Sinaga

NIM : 03051381621068

Judul : Studi Pengaruh Peniruan Morfologi Tulang Karsinoma Untuk Skafold Jenis Struktur Terdegradasi Takfungsional Berbahan Besi Murni Terhadap Karakteristik Aliran Fluida.

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, Desember 2020



Muhamad Sofyan Sinaga
NIM. 03051381621068

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muhamad Sofyan Sinaga

NIM : 03051381621068

Judul : Studi Pengaruh Peniruan Morfologi Tulang Karsinoma Untuk Skafold Jenis Struktur Terdegradasi Takfungsional Berbahan Besi Murni Terhadap Karakteristik Aliran Fluida.

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

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



Palembang, Desember 2020



Muhamad Sofyan Sinaga
NIM. 03051381621068

RINGKASAN

STUDI PENGARUH PENIRUAN MORFOLOGI TULANG KANSELUS UNTUK SKAFOLD JENIS STRUKTUR TERDEGRADASI TAKFUNGSIONAL BERBAHAN BESI MURNI TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA

Karya Tulis Ilmiah berupa skripsi, 23 Desember 2020

Muhamad Sofyan sinaga; Dibimbing oleh Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri

STUDY EFFECT OF MIMICKING CANCELLOUS BONE MORPHOLOGY FOR SCAFOLD TYPES OF THE FUNCTIONALLY DEGRADED STRUCTURES WITH PURE IRON ON FLUID FLOW CHARACTERISTICS

Xxx + 71 Halaman, 21 tabel, 44 gambar,

RINGKASAN

Tulang kanselus memegang peranan penting pada sistem struktural tulang, kerusakan atau penurunan fungsi pada kanselus mengakibatkan rusaknya seluruh jaringan pada tulang dikarenakan tulang tidak ternutrisi dengan baik. Pada saat ini skafold berbasis besi murni memiliki tingkat degradasi yang lebih rendah dibandingkan magnesium dan dapat digunakan distruktur yang kompleks pada model *non-functionally degraded structure*. Peniruan tulang terhadap skafold menjadi salah satu parameter metode dalam bidang morfologi porositas dan luas permukaan untuk pemodelan skafold *non-functionally degraded structure* dan perlu dilakukan kajian lebih lanjut secara aktual pengaruhnya terhadap permeabilitas untuk mendapatkan karakteristik aliran fluida pada tulang terhadap skafold. Karena model skafold *non-functionally degraded structure* memiliki porositas dan luas permukaan yang berbeda-beda di tiap perluasan yang mana akan berpengaruh terhadap tingkat biodegradasi. Karakteristik aliran fluida dan nilai permeabilitas itu sendiri diperoleh dengan cara melakukan rekonstruksi tulang kanselus yang digunakan sebagai parameter peniruan skafold dengan menggunakan perangkat lunak MIMICS *Research* dan MIMICS *3-Matic* untuk mendapatkan parameter morfologi perancangan skafold *non-functionally degraded structure* yang berdasarkan porositas dan luas permukaan, yang mana desain skafold dirancang

menggunakan perangkat lunak Solidwork yang kemudian dilakukan simulasi pada perangkat lunak Comsol Multiphysics 5.4b untuk mendapatkan karakteristik laju aliran fluida seperti tekanan, kecepatan fluida pada skafold dan tegangan geser fluida serta nilai permeabilitas dengan menggunakan dua jenis fluida yang berbeda yaitu SBF (*simulated body fluid*) dan *bone marrow* serta variasi 3 tingkatan laju aliran yaitu 0,8 ml/min, 0,4 ml/min dan 0,025 ml/min. Dari data hasil pengujian dan pengamatan yang sudah dilakukan maka didapatkan bahwa skafold dengan variasi porositas 61,6% dan 60% dengan luas permukaan 835,33 mm³ dan 850,71 mm³ menunjukkan bahwa porositas tidak memiliki korelasi linear terhadap permeabilitas karena permeabilitas itu sendiri lebih di pengaruhi oleh luas permukaan yaitu pada nilai 5,39889E-10 m² - 5,40299E-10 m² dan 2,14235E-09 m² - 2,1351E-09 m² untuk fluida SBF serta 5,41278E-10 m² - 5,43804E-10 m² dan 2,14235E-09 m² - 2,14317E-09 m² untuk fluida *bone marrow*. Morfologi dari skafold itu sendiri tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap aliran kecepatan fluida melainkan kepada laju geser atau tegangan geser fluida yang memberikan pengaruh signifikan terhadap tekanan fluida pada skafold. Perbedaan jenis fluida itu sendiri juga tidak memberikan pengaruh yang terlalu signifikan terhadap permeabilitas. Sedangkan untuk porositas skafold itu sendiri tidak menunjukkan korelasi linear terhadap permeabilitas melainkan jenis struktur morfologi dan luas permukaan itu sendiri. Dinamika aliran fluida dalam skafold berpori untuk rekayasa jaringan memainkan peranan penting dalam pengangkutan bahan dasar ke sel dan dalam pengendalian biokompatibilitas skafold. Sifat-sifat seperti permeabilitas dan tegangan geser dinding yang diinduksi aliran fluida menjadi ciri perilaku biologis skafold. Sehubungan dengan hasil yang didapatkan, kedua varian skafold mempunyai nilai permeabilitas yang lumayan baik dan masih berada pada standar nilai permeabilitas berdasarkan perbandingan nilai permeabilitas pada tulang kancellus dari eksperimental yang telah dilakukan sebelumnya.

Kata Kunci: skafold, *Mimicking*, Morfologi, Karakteristik aliran fluida, Permeabilitas.

SUMMARY

STUDY EFFECT OF MIMICKING CANCELLOUS BONE MORPHOLOGY FOR SCAFOLD TYPES OF THE FUNCTIONALLY DEGRADED STRUCTURES WITH PURE IRON ON FLUID FLOW CHARACTERISTICS

Scientific Writing in the form of Thesis, 23 December 2020

Muhamad Sofyan Sinaga; Suervised by Prof. Dr. Ir. H. Hasan Basri

STUDI PENGARUH PENIRUAN MORFOLOGI TULANG KANSELUS UNTUK SKAFOLD JENIS STRUKTUR TERDEGRADASI TAKFUNGSIONAL BERBAHAN BESI MURNI TERHADAP KARAKTERISTIK ALIRAN FLUIDA

Xxx + 71 Pages, 21 tables, 44 pictures,

SUMMARY

The cancellous bone plays an important role in the structural system of bones, damage or decreased function of the cancellus results in the destruction of all tissue in the bone because the bone is not properly nourished. Currently, pure iron based skafold has a lower degradation rate than magnesium and can be used in complex structures in the non-functionally degraded structural model. Imitation of bone against skafold is one of the method parameters in the field of porosity morphology and surface area for non-functionally scaffold modeling of degraded structures and it is necessary to carry out further studies on its actual effect on permeability to obtain fluid flow in the bone against the bone scaffolding. Because the non-functionally degraded structure scaffolding model has different porosity and surface area in each extension which will affect the level of biodegradation. Fluid flow characteristics and the permeability value itself were obtained by reconstructing the cancellous bone which was used as a bone scaffold imitation parameter using MIMICS Research and MIMICS 3-Matic software to obtain morphological parameters of the design of a non-functionally degraded structure based on porosity and surface. areas where the bone scaffold design is designed using Solidwork software which is then simulated on Comsol Multyphysics 5.4b software to obtain fluid flow rate characteristics such as pressure, fluid velocity on

the bone scaffold and fluid shear stress and permeability values using two different types of fluids namely SBF (simulated body fluid) and bone marrow and variations in 3 levels of flow rate, namely 0.8 ml / min, 4 ml / min and 0.025 ml / min. From the data from the test results and observations that have been carried out, it was found that bone scaffolding with a porosity variation of 61.6% and 60% with a surface area of 835.33 mm² and 850.71 mm² indicates that porosity does not have a linear correlation with permeability because the permeability itself is more influenced by the surface area, namely at the value of 5.39889E-10 m² - 5.40299E-10 m² and 2.14235E-09 m² - 2.1351E-09 m² for SBF fluid and 5.41278E-10 m² - 5.43804E-10 m² and 2.14235E-09 m² - 2.14317E-09 m² for bone marrow fluid. The morphology of the bone scaffold itself does not have a significant effect on the fluid velocity flow but on the shear rate or fluid shear stress which has a significant effect on fluid pressure in the bone scaffold. The difference in the type of fluid itself also does not have a too significant effect on permeability. Meanwhile, the porosity of the bone scaffold did not show a linear correlation with permeability, but rather the type of morphological structure and the surface area itself. The fluid flow dynamics in the porous bone scaffold for tissue engineering play an important role in the nutrient transport to the cells and in controlling the biocompatibility of the bone scaffold. Properties such as permeability and fluid flow induced wall shear stress characterize the biological behavior of bone scaffolding. In relation to the results obtained, the two scaffold variants have a fairly good permeability value and are still in the standard permeability value range based on the comparison of permeability values on the cancellous bone from previous experiments.

Key Word: Scaffold, Mimicking, Morphology, Fluid flow characteristic, Permeability.

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	iii
Halaman Pengesahan	v
Halaman Pengesahan Agenda....	vii
Halaman Persetujuan	ix
Kata Pengantar	xi
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi.....	xiii
Halaman Pernyataan Integritas	xv
Ringkasan.....	xvii
Summary	xix
Daftar isi.....	xxi
Daftra Gambar.....	xxv
Daftar Tabel	xxix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat penelitian.....	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Definisi, Fungsi dan Bagian-Bagian Penyusun Tulang	7
2.2 Penyusun Jaringan Tulang	9
2.2.1 Tulang kompak	9
2.2.2 Tulang Kanelus	10
2.3 Laju Aliran Sumsum Tulang	11
2.4 Persyaratan Perancangan Skafold	12

2.5 Mimicking Tulang Karsinoma.....	13
2.6 Rekayasa Skafold Alternatif Penyembuhan	14
2.6.1 Karakteristik Morfologi Perancah	16
2.6.2 Struktur Berpori Dan Porositas Pada Perancah.....	17
2.7 Permeabilitas Pada Tulang.....	19
2.8 Permeabilitas Skafold	20
2.9 CFD (Computational Fluid Dynamics)	21
2.9.1 Eksperimental dan Simulasi CFD	21
2.9.2 Karakteristik Fluida CFD	22
2.9.3 Postprocessing dan Analisis CFD	23
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	25
3.1 Pendekatan Umum.....	25
3.2 Diagram Alir	26
3.3 COMSOL Multiphysics	27
3.4 Computational Fluid Dynamic (CFD).....	28
3.5 Pengumpulan Data.....	28
3.5.1 Dimensi Skafold Non-FDS	29
3.5.2 Sifat Besi Murni (Fe).....	29
3.5.3 Karakteristik Fluida Pengujian.....	29
3.5.4 Profil Pembebanan Terhadap Induksi Laju Aliran.....	30
3.5.5 Profil Porositas Dan Ukuran Pori.....	31
3.6 Rekonstruksi Tulang Karsinoma	31
3.7 Pemodelan Skafold Tulang.....	32
3.7.1 Pemodelan 3D Skafold Non-FDS	33
3.7.2 Pemodelan 3D Fluid	34
3.7.3 Pemodelan 3D Chamber (Blok) Perancah	35
3.7.4 Penggabungan Model 3D	36
3.7.5 Input Fluida Pengujian	37
3.7.6 Kondisi Batas Skafold pada CFD.....	38

3.8 Meshing.....	38
3.8.1 Konvergen Studi Untuk Meshing	39
3.9 Analisa Dan Pengolahan Data.....	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Konvergen Studi Untuk Mesh CFD.....	41
4.2 Hasil Simulasi CFD (Computational Fluid Dynamics)	43
4.3 Kecepatan Aliran Fluida Menggunakan CFD.....	45
4.3.1 Kecepatan Aliran Fluida Tulang Karsinoma	45
4.3.2 Kecepatan Aliran Fluida Skafold Non-Fds.....	47
4.4 Tegangan Geser Fluida Menggunakan CFD.....	50
4.4.1 Tegangan Geser Tulang Karsinoma	50
4.4.2 Tegangan Geser Skafold Non-Fds.....	52
4.5 Tekanan Fluida Pada CFD	54
4.5.1 Tekanan fluida Skafold Non-Fds.....	56
4.6 Permeabilitas Skafold Non-Fds.....	58
4.6.1 Permeabilitas Skafold Fluida SBF.....	58
4.6.2 Permeabilitas Skafold Fluida Bone Marrow.....	60
4.7 Perbandingan Permeabilitas Skafold.....	61
4.8 Hubungan Porositas Dan Surface Area Terhadap Permeabilitas	63
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA	69

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi kerangka berdasarkan bentuk tulang (McMahon, 2008) ..	7
Gambar 2.2 Struktur jaringan tulang (McMahon, 2008).	8
Gambar 2.3 Diagram Tulang kompak. (a) <i>Cross-sectional</i> struktur dasar tulang kompak. (B) <i>Micrograft</i> pada osteon (McMahon, 2008).....	9
Gambar 2.4 Diagram jaringan tulang kancellus (McMahon, 2008).....	10
Gambar 2.5 SEM <i>micrograph</i> turunan skafold dengan gradien 3D porositas secara kontinu setelah sintering pada berbagai tingkat pepadatan jaringan spons (Baino, 2019).	13
Gambar 2.6 Proses regenerasi skafold	15
Gambar 2.7 Pendekatan desain perancah: perwakilan unit sel dan blok (Wang et al., 2016).	16
Gambar 2.8 Model 3D sintetik dan tulang kancellus alami: (a) 3D CAD model sintetik, (b) model prototipe, (c) model alami tulang kancellus dari data μCT scanner, (d) contoh alami asli tulang kancellus (Syahrom et al., 2015)	17
Gambar 2.9 Hubungan antara ukuran pori dan tegangan geser (Wang and Yu, 2010).	18
Gambar 2.10 Diagram perbandingan pengaruh antara: (a) Permeabilitas terhadap porositas, (b) Permeabilitas terhadap area permukaan.....	20
Gambar 3.1 Diagram alir	26
Gambar 3.2 Analogi rekonstruksi model 3D dari <i>rawdata</i> μCT scanner Setelah dilakukan rekonstruksi tulang dari data hasil μCT scanner: (a) Proses rekonstruksi menggunakan MIMICS <i>Research</i> , (b) Contoh tulang kancellus yang telah direkonstruksi (Syahrom et al., 2013)	32
Gambar 3.3 Pemodelan ideal berdasarkan tulang kancellus dari dua unit <i>cell</i> , tetraikaidekahedral dan prisma (Syahrom et al., 2013)	33
Gambar 3.4 Pemodelan skafold <i>non-functionally degraded structure</i> : (a) Gambar a, b, c dan d adalah skafold non-FDS model a, (b) Gambar e, f, g dan h adalah skafold model b.	34
Gambar 3.5 Pemodelan 3D aliran fluida.....	35

Gambar 3.6 Pemodelan 3D <i>chamber</i> fluida	36
Gambar 3.7 Hasil penggabungan model 3D skafold dengan model 3D <i>chamber</i> dan model 3D fluida.	36
Gambar 3.8 Penginputan nilai fluida pengujian <i>simulated body fluid</i>	37
Gambar 3.9 Penginputan nilai fluida pengujian sumsum tulang.....	37
Gambar 3.10 Kondisi batas untuk simulasi CFD (Syahrom et al., 2013)	38
Gambar 3.11 Contoh proses meshing pada simulasi COMSOL <i>Multyphysics</i> : (a) <i>Double-diamond</i> , (b) <i>Gyroid</i> , (c) <i>FR-D</i> , (d) <i>Schwarz-primitive</i> (Ali, 2019). 39	39
Gambar 4.1 Studi konvergen hubungan jumlah elemen <i>mesh</i> dan <i>pressure</i>	42
Gambar 4.2 Grafik analisa presentasi eror (GCI) menggunakan <i>Richardson's</i> <i>extrapolation method</i>	43
Gambar 4.3 Visualisasi 2D irisan CFD skafold <i>hexagon</i> non-fds. (a) visualisasi irisan 2D <i>velocity</i> , (b) visualisasi irisan 2D <i>pressure</i> , (c) visualisasi irisan 2D <i>shear stress</i>	44
Gambar 4.4 Visualiasi 2D irisan CFD skafold <i>pillar octahedron</i> non-fds. (a) visualisasi irisan 2D <i>velocity</i> , (b) visualisasi irisan 2D <i>pressure</i> , (c) visualisasi irisan 2D <i>shear stress</i>	44
Gambar 4.5 visualisasi 3D kontur laju aliran tulang kanselus pada simulasi CFD	45
Gambar 4.6 Visualisasi 3D dan area permukaan kecepatan fluida dengan tiga variasi laju aliran pada tiga sampel tulang kanselus.....	46
Gambar 4.7 Visualisasi irisan 3D dan area permukaan kecepatan fluida dengan tiga variasi laju aliran pada skafold non-fds.....	48
Gambar 4.8 Visualisasi irisan 3D dan area permukaan kecepatan fluida dengan tiga variasi laju aliran pada skafold non-fds <i>pillar octahedron</i>	49
Gambar 4.9 Visual 3D kontur permukaan laju geser pada tulang kanselus dengan varaisi laju aliran 0,8 ml/min, 0,4 ml/min dan 0,025 ml/min.	51
Gambar 4.10 Visualisasi irisan 3D dan area permukaan laju geser fluida dengan tiga variasi laju aliran pada skafold non-fds.....	52
Gambar 4.11 Visualisasi irisan 3D dan area permukaan laju geser fluida dengan tiga variasi laju aliran pada skafold non-fds <i>bone marrow</i>	53

Gambar 4.12 Visual 3D kontur permukaan tekanan pada tulang kancellus dengan variasi laju aliran 0,8 ml/min, 0,4 ml/min dan 0,025 ml/min.	55
Gambar 4.13 Visualisasi irisan 3D dan area permukaan tekanan aliran fluida dengan tiga variasi laju aliran pada skafold non-fds SBF.....	56
Gambar 4.14 Visualisasi irisan 3D dan area permukaan tekanan aliran fluida dengan tiga variasi laju aliran pada skafold non-fds <i>bone marrow</i>	57
Gambar 4.15 Hubungan perbandingan permeabilitas dan laju aliran skafold <i>hexagon</i> pada fluida SBF.	59
Gambar 4.16 Hubungan perbandingan permeabilitas dan laju aliran skafold <i>pillar octahedron</i> pada fluida SBF.	59
Gambar 4.17 Hubungan perbandingan permeabilitas dan laju aliran skafold <i>hexagon</i> pada fluida <i>bone marrow</i>	60
Gambar 4.18 Hubungan perbandingan permeabilitas dan laju aliran skafold <i>pillar octahedron</i> pada fluida <i>bone marrow</i>	61
Gambar 4.19 perbandingan permeabilitas pada skafold <i>hexagon sphere</i> pada fluida <i>simulated body fluid</i> dan <i>bone marrow</i>	62
Gambar 4.20 perbandingan nilai permeabilitas pada skafold <i>pillar octahedron</i> pada fluida <i>simulated body fluid</i> dan <i>bone marrow</i>	62
Gambar 4.21 perbandingan nilai permeabilitas tulang kancellus dari penelitian sebelumnya dengan permeabilitas skafold dalam penelitian ini.....	63
Gambar 4.22 hubungan perbandingan permeabilitas dan laju aliran skafold <i>hexagon sphere</i> dan <i>pillar octahedron</i> pada fluida SBF.....	64
Gambar 4.23 hubungan perbandingan permeabilitas dan laju aliran skafold <i>hexagon sphere</i> dan <i>pillar octahedron</i> pada fluida <i>bone marrow</i>	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik aliran fluida CFD (Date, 2005)	22
Tabel 3.1 Dimensi skafold model <i>non-fds</i>	29
Tabel 3.2 Karakteristik fluida 1 (<i>simulated body fluid</i>) (Md Saad et al., 2016) ...	30
Tabel 3.3 Karakteristik fluida 2 (<i>bone marrow</i>) (Gurkan and Akkus, 2008)	30
Tabel 3.4 Profil pembebanan skafold berdasarkan aktifitas fisiologis manusia (Basri et al., 2017).....	31
Tabel 4.1 Studi konvergen simulasi tulang kanselus SBF (tekanan).....	41
Tabel 4.2 Richardson's extrapolation method data.....	42
Tabel 4.3 Kecepatan maksimum aliran fluida dengan <i>bone marrow</i> 3 laju aliran.	46
Tabel 4.4 Kecepatan maksimum aliran fluida dengan SBF 3 laju aliran.....	47
Tabel 4.5 Kecepatan maksimum aliran fluida dengan <i>bone marrow</i> 3 laju aliran pada skafold.	48
Tabel 4.6 Tegangan geser tulang kanselus fluida <i>bone marrow</i> dengan 3 variasi laju aliran.	50
Tabel 4.7 Tegangan geser fluida pada skafold dengan SBF 3 laju aliran.....	52
Tabel 4.8 Teganga geser fluida pada skafold dengan <i>bone marrow</i> 3 laju aliran pada skafold.	53
Tabel 4.9 Tekanan maksimum dengan 3 variasi laju aliran pada fluida <i>bone marrow</i>	54
Tabel 4.10 Tekanan aliran fluida pada skafold dengan SBF 3 laju aliran.	56
Tabel 4.11 Tekanan aliran fluida pada skafold dengan <i>bone marrow</i> 3 laju aliran pada skafold.	57
Tabel 4.12 Permeabilitas pada skafold <i>hexagon sphere</i> dengan variasi tiga laju aliran Fluida SBF.	58
Tabel 4.13 Permeabilitas pada skafold <i>pillar octahedron</i> dengan variasi tiga laju aliran Fluida SBF.	59
Tabel 4.14 Permeabilitas pada skafold <i>hexagon sphere</i> dengan variasi tiga laju aliran fluida <i>bone marrow</i>	60

Tabel 4.15 Permeabilitas pada skafold <i>pillar octahedron</i> dengan variasi tiga laju aliran fluida <i>bone marrow</i>	60
Tabel 4.16 morfologi dari kedua skafold Non-Fds.....	64

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Tulang tersusun dari matriks seluler dan sel. Matriks seluler terdiri dari komponen organik dan anorganik. Ditinjau dari beratnya, jaringan tulang tersusun atas 70% mineral (matriks anorganik), 20-25% matriks organik dan 5-8% air, tetapi terdapat variasi utama pada derajat mineralisasi matriks bergantung pada fungsinya. Komponen anorganik tersusun dari beberapa mineral terbanyak (95%) dalam kristal. Matriks organik tersusun dari 90% kolagen tipe I yang tersusun dari proteoglikan dan protein non kolagen (Seeman, 2008).

Tulang itu sendiri tersusun dari beberapa jaringan, yaitu tulang kompak dan tulang kanelus (Kane and Ma, 2013). Tulang itu sendiri tersusun dari kolagen yang mana berperan untuk kekuatan tarik tulang. Tulang kompak adalah penyusun terbesar struktur kerangka dengan 80% bagian memiliki kekuatan mekanis dan nilai modulus elastisitas yang cukup tinggi dan mampu untuk menahan beban tekukan dan puntiran berat. Tulang kompak berada di tulang eksteminitas dan vertebrata. Sedangkan untuk tulang kanelus memiliki modulus elastisitas kecil dan proses pertumbuhan jaringan lebih cepat. Tulang dilindungi oleh selaput tipis pada tulang kompak yang berfungsi memegang kapiler, memberi tendon dan tempat untuk penempelan otot (*periosteum*).

Hubungan antara osteoporosis dan mekanisme kegagalan dapat dinilai melalui kualitas tulang secara kuantitatif dan studi klinis. Arsitektur tulang kanelus itu sendiri sangat heterogen, anisotropik dan tergantung pada lokasi skelet karena perbedaan rangsangan mekanis eksternal (Syahrom et al., 2010). Sifat mekanis ini akan memburuk akibat penuaan atau karena penyakit tulang seperti *osteoporosis* dan *osteoarthritis*.

Prosedur bedah tulang dilakukan untuk memperbaiki jaringan yang telah rusak. Operasi bedah dilakukan pada tulang yang mengalami penurunan kualitas

dan mati atau disebut *nekrosis*. kemudian diangkat dan dengan pengeboran kemudian diganti dengan skafold. Pembedahan bertujuan untuk menumbuhkan kembali jaringan-jaringan yang telah mati dengan menggabungkan sel-sel baru dari tubuh dengan biomaterial perncah berpori, yang bertindak sebagai template untuk regenerasi jaringan, untuk memandu pertumbuhan jaringan baru. (O'Brien, 2011).

Penggunaan skafold adalah standar untuk mengobati patah tulang rangka, atau untuk regenerasi dan menggantikan peran tulang yang hilang sementara. Ada beberapa jenis prosedur pembedahan yaitu cangkok dari tubuh sendiri (*autologous graft*), cangkok dari hewan (*zenogenic graft*). cangkok dari manusia lain (*allogenic graft*), prosedur yang paling umum ini adalah *autograft*, namun penggunaannya masih memiliki banyak kelemahan. Alternatifnya adalah *allograft*, tetapi hal itu sendiri tidak memiliki kapasitas *osteactive* dari *autografts* dan beresiko membawa agen infeksi atau penolakan kekebalan tubuh. Pendekatan lainnya, seperti pengganti skafold, telah berfokus pada peningkatan efektivitas skafold lainnya dengan memasukkan sel-sel *progenitor* tulang dan faktor pertumbuhan untuk merangsang sel-sel (Polo-Corrales et al., 2014).

Terlepas dari jenis jaringan, sejumlah pertimbangan utama yang penting ketika merancang atau menentukan kesesuaian skafold untuk digunakan dalam teknik jaringan harus memiliki sifat skafold yang baik. (O'Brien, 2011). Pertama yaitu harus memungkinkan skafold mendukung aktifitas perkembangan jaringan tulang yang ditopang dan bersifat tidak beracun (biokompatibilitas). Kedua, memiliki kemungkinan untuk perkembangan sel jaringan baru pada pori-pori skafold (osteokonduktifitas), mempunyai persamaan atau pendekatan sifat mekanik, struktur berpori agar nutrisi dan sel pembentuk jaringan dapat beregenerasi, dan yang terakhir harus dapat tergenerasi dengan waktu yang telah ditentukan (bioresorbabilitas).

Sebuah cangkok tulang ideal atau skafold harus dibuat dari biomaterial yang meniru struktur dan sifat dari EMC tulang alami, termasuk sel *osteoprogenitor* dan menyediakan semua isyarat lingkungan yang diperlukan ditemukan dalam tulang alami. Namun, menciptakan kontsruksi nyata jaringan

secara struktural, fungsional dan mekanis sebanding dengan tulang alami telah menjadi tantangan sejauh ini (Polo-Corrales et al., 2014).

Permodelan skafold yang struktural tentu saja akan mempengaruhi beberapa hal, seperti aliran fluida, *permeability*, dan *stress*. Dan juga akan membentuk porositas yang berbeda di setiap perluasan. Prosedur analisis dan berbasis *numeric computer simulation* dilakukan untuk skafold dengan berbagai porositas dan pengaruh mereka pada proses biodegradasi skafold, sementara bio-cairan mengalir didalam skafold diikuti oleh perubahan laju aliran. Penerapan kondisi batas untuk dinamika komputasi fluida (CFD), membuat tegangan geser permukaan (*stress*) dalam skafold dengan tingkatan variasi yang telah disimulasikan dan ditentukan sebelum dan sesudah degradasi. Pada peningkatan porositas, penurunan tekanan menjadi berkurang dengan peningkatan permeabilitas dalam perancah. Tingkat aliran memiliki efek signifikan pada skafold dengan tekanan yang lebih tinggi dengan nilai *stress* tertinggi dan permeabilitas yang lebih rendah (Basri et al., 2017).

Aktifitas fisiologis manusia juga berperan penting bagi *homeostasis* tulang. Hal ini akan mengakibatkan stimulus mekanik aliran fluida menjadi terinduksi karena adanya perbedaan tekanan. Pemuatan rata-rata selama berjalan, jogging dan jalan cepat, memanjat tangga dan tersandung adalah $3,1 \text{ berat} \times \text{badan (BB)}$; $6,2 \times \text{BW}$; dan $8,7 \times \text{BW}$. Masing-masing BW didasarkan pada 75 berat awal. Variasi dalam beban mekanis menghasilkan *strain* tulang yang berbeda ($1000\text{-}3500 \mu\epsilon$) yang menghasilkan tekanan yang berbeda-beda di tulang (Basri et al., 2017). Hal ini juga menginduksi tingkat aliran yang berbeda, dan menyebabkan variasi yang berbeda dalam laju aliran juga menginduksi tegangan geser yang berbeda. Ini juga akan berefek terhadap porositas dan ukuran pori yang mana jika terjadi peningkatan porositas dan ukuran pori maka permeabilitas juga meningkat begitu juga sebaliknya.

Berdasarkan pembahasan di atas, akan ditentukan pokok bahasan dari penelitian-penelitian yang sudah ada sebelumnya dengan judul **“Studi Pengaruh Peniruan Morfologi Tulang Karsinus untuk Skafold Jenis Struktur Terdegradasi Takfungsional Berbahan Besi Murni terhadap Karakteristik Aliran Fluida.”**

1.2 Rumusan Masalah

Tulang karsinoma memegang peranan penting pada sistem struktural tulang, kerusakan atau penurunan fungsi pada karsinoma mengakibatkan rusaknya seluruh jaringan pada tulang dikarenakan tulang tidak ternutrisi dengan baik. Pada saat ini scaffold berbasis besi murni memiliki tingkat degradasi yang lebih rendah dibandingkan magnesium dan dapat digunakan di struktur yang kompleks pada model *non-functional degraded structure*. Peniruan tulang terhadap scaffold menjadi salah satu parameter metode dalam bidang morfologi porositas dan ukuran pori untuk pemodelan scaffold *non-functionally degraded structure* dan perlu dilakukan kajian lebih lanjut secara aktual pengaruhnya terhadap permeabilitas untuk mendapatkan karakteristik aliran fluida pada tulang terhadap scaffold. Karena model *non-functionally degraded structure* mempunyai porositas dan ukuran pori yang berbeda di tiap perluasan dimana akan mempunyai pengaruh terhadap tingkat biodegradasi. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian dengan metode simulasi menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multyphysics 5.4*.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang diambil dalam menganalisis scaffold untuk tugas akhir ini, antara lain:

1. Pemodelan geometri tulang berdasarkan hasil rekonstruksi dari hasil μ CT scanner menggunakan perangkat lunak MIMICS.
2. Pemodelan geometri scaffold didesain berdasarkan parameter morfologi tulang karsinoma menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2016
3. Material yang digunakan untuk model solid scaffold adalah besi murni.
4. Fluida pengujian yang digunakan untuk simulasi model fluida adalah *simulated body fluid* dan fluida sumsum tulang bersifat laminar, *steady state, incompressible fluid* dan *Newtonian fluid* serta kondisi *no slip wall*
5. Nilai karakteristik aliran fluida meliputi kecepatan aliran, tekanan, tegangan geser serta permeabilitas pada scaffold dan tulang karsinoma

didapatkan dengan metode CFD menggunakan perangkat lunak Comsol Multiphysics 5.4b.

6. Pengaruh variasi morfologi terhadap nilai karakteristik aliran fluida pada skafold meliputi perbandingan porositas dan luasan permukaan.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan nilai karakteristik aliran fluida pada skafold *non-functionally degraded structure* meliputi tekanan fluida, *velocity*, tegangan geser dan permeabilitas.
2. Mengetahui perkembangan permeabilitas skafold dengan adanya variasi jenis fluida yaitu *simulated body fluid* dan *bone marrow*
3. Memperoleh pengaruh morfologi skafold *non-functionally degraded structure* dengan tulang kanselus aktual terhadap permeabilitas.

1.5 Manfaat penelitian

1. Bentuk kontribusi untuk perkembangan ilmu biomekanik di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
2. Mampu memberikan pengetahuan lanjutan dari perkembangan kemampuan permeabilitas dan porositas dengan berdasarkan peniruan (*mimicking*) terhadap sumsum tulang untuk mahasiswa yang akan melakukan penelitian lebih lanjut.
3. Penelitian tentang peniruan morfologi aktual tulang kanselus menggunakan material besi murni kedalam model skafold *non-fds* berpori yang bermanfaat untuk memahami karakteristik aliran fluida dengan variasi porositas, ukuran pori dan luas permukaan yang berbeda.
4. Untuk dapat dijadikan sebagai acuan bagi penelitian selanjutnya untuk pengembangan model skafold berbasis besi murni dengan menggunakan metode analisa *computational fluid dynamics* dan Fsi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afshar, M., Anaraki, A.P., Montazerian, H., and Kadkhodapour, J., 2016. Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 62, 481–494.
- Ali, D., 2019. Effect of scaffold architecture on cell seeding efficiency: A discrete phase model CFD analysis. *Comput. Biol. Med.* 109, 62–69.
- Ali, D., Ozalp, M., Blanquer, S.B.G., and Onel, S., 2020. Permeability and fluid flow-induced wall shear stress in bone scaffolds with TPMS and lattice architectures: A CFD analysis. *Eur. J. Mech. B/Fluids* 79, 376–385.
- Baino, F., 2019. *Functionally Graded Bioactive Glass-Derived Scaffolds Mimicking Bone Tissue, Biomedical, Therapeutic and Clinical Applications of Bioactive Glasses.* Elsevier Ltd.
- Basri, H., Nasution, J.D., Syahrom, A., Sulong, M.A., Md. Saad, A.P., Prakoso, A.T., and Aminin, F., 2017. The effect to flow rate characteristic on biodegradation of bone scaffold. *Malaysian J. Fundam. Appl. Sci.* 546–552.
- Cleary, M., 2019. Mechanical Behavior and Characteristic of Pure Iron. *J. Chem. Inf. Model.* 53, 1689–1699.
- Daish, C., Blanchard, R., Gulati, K., Losic, D., Findlay, D., Harvie, D.J.E., and Pivonka, P., 2017. Estimation of anisotropic permeability in trabecular bone based on microCT imaging and pore-scale fluid dynamics simulations. *Bone Reports* 6, 129–139.
- Dallemagne, M.J., and Fabry, C., 2008. Structure of Bone Salts 14–35.
- Date, A.W., 2005. Introduction to computational fluid dynamics. *Introd. to Comput. Fluid Dyn.* 9780521853, 1–377.
- Divieti Pajevic, P., and Krause, D.S., 2019. Osteocyte regulation of bone and blood. *Bone* 13–18.
- Gurkan, U.A., and Akkus, O., 2008. The mechanical environment of bone marrow: A review. *Ann. Biomed. Eng.* 36, 1978–1991.
- Hutmacher, D.W., 2000. Scaffolds in tissue engineering bone and cartilage.

- Biomater. Silver Jubil. Compend. 21, 175–189.
- Kane, R., and Ma, P.X., 2013. Mimicking the nanostructure of bone matrix to regenerate bone. *Mater. Today* 16, 418–423.
- Li, Y., Jahr, H., Lietaert, K., Pavanram, P., Yilmaz, A., Fockaert, L.I., Leeflang, M.A., Pouran, B., Gonzalez-Garcia, Y., Weinans, H., Mol, J.M.C., Zhou, J., and Zadpoor, A.A., 2018. Additively manufactured biodegradable porous iron. *Acta Biomater.* 380–393.
- Li, Y., Jahr, H., Pavanram, P., Bobbert, F.S.L., Puggi, U., Zhang, X.Y., Pouran, B., Leeflang, M.A., Weinans, H., Zhou, J., and Zadpoor, A.A., 2019. Additively manufactured functionally graded biodegradable porous iron. *Acta Biomater.* 96, 646–661.
- McMahon, R., 2008. Anatomy & Physiology. In: *Journal of Neonatal Nursing*. pp. 203–238.
- Md Saad, A.P., Jasmawati, N., Harun, M.N., Abdul Kadir, M.R., Nur, H., Hermawan, H., and Syahrom, A., 2016. Dynamic degradation of porous magnesium under a simulated environment of human cancellous bone. *Corros. Sci.* 112, 495–506.
- Mohd Daud, N., Sing, N.B., Yusop, A.H., Abdul Majid, F.A., and Hermawan, H., 2014. Degradation and invitro cell-material interaction studies on hydroxyapatite-coated biodegradable porous iron for hard tissue scaffolds. *J. Orthop. Transl.* 2, 177–184.
- Nantavisai, S., Egusa, H., Osathanon, T., and Sawangmake, C., 2019. Mesenchymal stem cell-based bone tissue engineering for veterinary practice. *Heliyon* 5, e02808.
- O'Brien, F.J., 2011. Biomaterials & scaffolds for tissue engineering. *Mater. Today* 14, 88–95.
- Paula, A., Madrid, M., Paola, A., Vrech, S.M., and Sanchez, M.A., 2019. Materials Science & Engineering C Advances in additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds. *Mater. Sci. Eng. C* 100, 631–644.
- Polo-Corrales, L., Latorre-Esteves, M., and Ramirez-Vick, J.E., 2014. Scaffold design for bone regeneration. *Journal of nanoscience and nanotechnology* 14, 15–56.

- Sandino, C., Kroliczek, P., McErlain, D.D., and Boyd, S.K., 2014. Predicting the permeability of trabecular bone by micro-computed tomography and finite element modeling. *J. Biomech.* 47, 3129–3134.
- Seeman, E., 2008. Bone quality: The material and structural basis of bone strength. *J. Bone Miner. Metab.* 26, 1–8.
- Sharma, P., Jain, K.G., Pandey, P.M., and Mohanty, S., 2020. In vitro degradation behaviour, cytocompatibility and hemocompatibility of topologically ordered porous iron scaffold prepared using 3D printing and pressureless microwave sintering. *Mater. Sci. Eng. C* 106, 110247.
- Syahrom, A., Abdul Kadir, M.R., Abdullah, J., and Öchsner, A., 2013. Permeability studies of artificial and natural cancellous bone structures. *Med. Eng. Phys.* 35, 792–799.
- Syahrom, A., Abdul Kadir, M.R., and Al-Jefri Muslim, D., 2010. Relationship between morphological parameters of cancellous bone and its mechanical properties. *Proc. 2010 IEEE EMBS Conf. Biomed. Eng. Sci. IECBES 2010* 336–340.
- Syahrom, A., Abdul Kadir, M.R., Harun, M.N., and Öchsner, A., 2015. Permeability study of cancellous bone and its idealised structures. *Med. Eng. Phys.* 37, 77–86.
- Tariverdian, T., Sefat, F., Gelinsky, M., and Mozafari, M., 2019. Scaffold for bone tissue engineering. *Handb. Tissue Eng. Scaffolds Vol. One* 189–209.
- Wang, J., Yu, X., 2010. Acta Biomaterialia Preparation , characterization and in vitro analysis of novel structured nanofibrous scaffolds for bone tissue engineering. *Acta Biomater.* 6, 3004–3012.
- Wang, X., Xu, S., Zhou, S., Xu, W., Leary, M., Choong, P., Qian, M., Brandt, M., and Xie, Y.M., 2016. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials* 83, 127–141.
- Yuan, L., Ding, S., and Wen, C., 2019. Bioactive Materials Additive manufacturing technology for porous metal implant applications and triple minimal surface structures : A review. *Bioact. Mater.* 4, 56–70.