

TESIS

**ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TEKAN
TERHADAP DISTRIBUSI TEGANGAN PADA STRUKTUR
PERMUKAAN TULANG RAWAN**



DICKY PRATAMA PUTRA
NIM. 03032682024004

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2022**

TESIS

**ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TEKAN
TERHADAP DISTRIBUSI TEGANGAN PADA STRUKTUR
PERMUKAAN TULANG RAWAN**

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



DICKY PRATAMA PUTRA
NIM. 03032682024004

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2022**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TEKAN TERHADAP DISTRIBUSI TEGANGAN PADA STRUKTUR PERMUKAAN TULANG RAWAN

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

Oleh:

DICKY PRATAMA PUTRA
NIM. 03032682024004

Telah disetujui

Palembang, 29 Desember 2022

Menyetujui,
Pembimbing Utama



Prof. Ir. Hasan Basri, Ph.D
NIP. 195802011984031002

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Sriwijaya



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

Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

HALAMAN PERSETUJUAN

Tesis dengan judul “ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TEKAN TERHADAP DISTRIBUSI TEGANGAN PADA STRUKTUR PERMUKAAN TULANG RAWAN” telah diseminarkan di hadapan Tim Penguji Laporan Tesis Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada Tanggal 17 Desember 2022 dan dinyatakan sah untuk melakukan penelitian lebih lanjut.

Palembang, 29 Desember 2022

Pembimbing:

1. Prof. Ir. Hasan Basri, Ph.D
NIP. 195802011984031002



(.....)

Tim Penguji Laporan Tesis:

1. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D
NIP. 197112251997021001
2. Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T
NIP. 196004071990031003
3. Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 197901052003121002

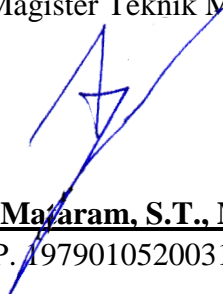


(.....)

(.....)

(.....)

Koordinator Program Studi
Magister Teknik Mesin



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

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

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

TESIS

**NAMA : Dicky Pratama Putra
NIM : 03032682024004
JURUSAN : Teknik Mesin
BIDANG STUDI : Perancangan Mesin
JUDUL TESIS : Analisis Pengaruh Pembebanan Tekan Terhadap Distribusi Tegangan Pada Struktur Permukaan Tulang Rawan
DIBUAT TANGGAL : 26 Agustus 2022
SELESAI TANGGAL : 29 Desember 2022**

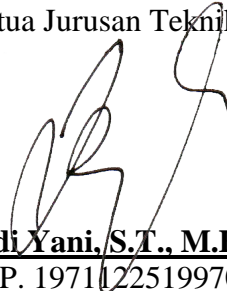
Palembang, 29 Desember 2022

Menyetujui,
Pembimbing Utama



Prof. Ir. Hasan Basri, Ph.D
NIP. 195802011984031002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

KATA PENGANTAR

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

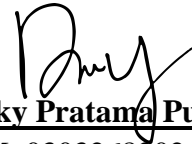
1. Keluarga Penulis, kedua Orang tua yang selalu memberikan dukungan moral dan materi serta doanya yang tulus membimbing, mengarahkan, mendidik dan memotivasi penulis dari awal hingga selesainya laporan tesis ini.
2. Bapak Prof. Ir. Hasan Basri, Ph.D selaku Dosen Pembimbing Utama Laporan Tesis yang dimana dengan ikhlas dan tulus telah membimbing, mengarahkan, mendidik, memotivasi serta banyak memberikan saran kepada penulis dari awal hingga selesainya laporan tesis ini.
3. Bapak Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D, Bapak Dr. Ir. Hendri Chandra, M.T, dan Bapak Agung Mataram, S.T., M.T., Ph.D selaku Tim Penguji Laporan Tesis Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang juga memberikan bimbingan serta arahan dalam ruang lingkup Jurusan Teknik Mesin.
4. Bapak Agung Kristian selaku Staf Administrasi Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya yang telah banyak membantu dalam proses administrasi.
5. Rekan-rekan Program Studi Magister Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya dan Rekan sesama peneliti yang mengambil fokus di bidang topik penelitian yang sama, yang membantu saya dalam menjalankan penelitian, menyusun laporan tesis sehingga bersama-sama Kami di berbagai kondisi suka dan duka.

Dalam penulisan laporan tesis ini, penulis sadar masih terdapat kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran serta masukan yang bersifat membangun sangat

penulis harapan untuk membantu dalam perbaikan. Penulis juga mengharapkan laporan tesis dengan judul “ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TEKAN TERHADAP DISTRIBUSI TEGANGAN PADA STRUKTUR PERMUKAAN TULANG RAWAN” dapat memberikan manfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan di Indonesia serta menjadi referensi bagi yang akan mengkaji di bidang topik penelitian yang sama dimasa yang akan datang.

Palembang, 29 Desember 2022

Penulis



Dicky Pratama Putra

NIM. 03032682024004

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dicky Pratama Putra

NIM : 03032682024004

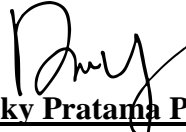
Judul : Analisis Pengaruh Pembebanan Tekan Terhadap Distribusi Tegangan Pada Struktur Permukaan Tulang Rawan

Memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu) tahun, saya tidak mempublikasikan karya penelitian ini. Dalam hal 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, 29 Desember 2022

Penulis



Dicky Pratama Putra

NIM. 03032682024004

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Dicky Pratama Putra

NIM : 03032682024004

Judul : Analisis Pengaruh Pembebanan Tekan Terhadap Distribusi Tegangan Pada Struktur Permukaan Tulang Rawan

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

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



Palembang, 29 Desember 2022



Dicky Pratama Putra

NIM. 03032682024004

RINGKASAN

Analisis Pengaruh Pembebanan Tekan Terhadap Distribusi Tegangan Pada Struktur Permukaan Tulang Rawan

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 29 Desember 2022

Dicky Pratama Putra Dibimbing Oleh Prof. Ir. Hasan Basri, Ph.D

Analisis Pengaruh Pembebanan Tekan Terhadap Distribusi Tegangan Pada Struktur Permukaan Tulang Rawan [BAHASA INGGRIS]

xix + 45 halaman, 4 Tabel, 17 Gambar, ... Lampiran

RINGKASAN

Salah satu metode pengukuran yang cepat untuk memprediksi distribusi pembebanan pada struktur permukaan dari tulang rawan adalah dengan teknik pengujian indentasi. Metode yang digunakan dalam studi ini berupa tinjauan sistematis untuk meninjau setiap desain studi dengan bukti eksperimental untuk menilai distribusi tegangan dengan pembebanan tekan pada struktur permukaan tulang rawan tibial plateau lateral dengan teknik indentasi, dan metode pendekatan simulasi elemen hingga untuk memvalidasi dan membandingkan model hasil uji eksperimental dari sampel osteokondral bagian lateral tulang sapi daerah tibial plateau. Hasil simulasi menunjukkan bahwa besarnya tegangan kompresive yang diakibatkan oleh pembebanan berupa *displacement* hasil eksperimental sebesar 0.2 mm adalah 0.00035 MPa. Sedangkan, pada hasil simulasi tegangan maksimum von Mises didapatkan sebesar 0.000324 MPa sehingga nilai validasi yang didapatkan dari perbandingan uji eksperimental dan simulasi sebesar 7.4286%. Berdasarkan analisis pengaruh pembebanan tekan terhadap distribusi tegangan dapat disimpulkan dari variasi model yang telah disimulasikan, bahwa semakin besar porositas yang berada pada tulang cancellous maka distribusi tegangan ditulang kancellus akan semakin tinggi.

Kata kunci: Tulang rawan artikular, sifat mekanik, uji indentasi, pembebanan tekan, tinjauan sistematis

SUMMARY

Analysis Of The Effect Of Compressive Loading On Stress Distribution In The
Surface Structure Of Cartilage

Karya tulis ilmiah berupa Tesis, 29 Desember 2022

Dicky Pratama Putra Dibimbing Oleh Prof. Ir. Hasan Basri, Ph.D

*Analysis Of The Effect Of Compressive Loading On Stress Distribution In The
Surface Structure Of Cartilage*

xix + 45 halaman, 4 Tabel, 17 Gambar, ... Lampiran

SUMMARY

One of the fast measurement methods to predict the loading distribution on the surface structure of cartilage is the indentation testing technique. The method used in this study is a systematic review to review each study design with experimental evidence to assess the stress distribution under compressive loading on the surface structure of the lateral tibial plateau cartilage by indentation techniques, and the finite element simulation approach method to validate and compare the model experimental results. from an osteochondral sample of the lateral bovine bone at the tibial plateau. The simulation results show that the magnitude of the compressive stress caused by loading in the form of an experimental displacement of 0.2 mm is 0.00035 MPa. Meanwhile, the results of the von Mises maximum stress simulation were obtained at 0.000324 MPa so that the validation value obtained from the comparison of experimental tests and simulations was 7.4286%. Based on the analysis of the effect of compressive loading on the stress distribution, it can be concluded from the various models that have been simulated, that the greater the porosity in the cancellous bone, the stress distribution in the cancellous bone will be higher.

Keywords: Articular cartilage, mechanical properties, indentation test, compressive loading, systematic review

DAFTAR ISI

	Hal
TESIS	i
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
KATA PENGANTAR.....	vi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	viii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS	ix
RINGKASAN.....	x
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR SIMBOL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Pernyataan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Tujuan Penelitian.....	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Literatur Review.....	6
2.2 Definisi Tulang.....	10
2.3 Persendian dan Struktur Tulang	12
2.4 Tulang Rawan Artikular	13
2.5 Tulang Subkondral	14
2.6 Tulang Karselus	16
2.7 Hubungan Antar Lapisan Tulang Rawan, Subkondral, dan Karselus	18
2.8 Teori Elastisitas	19
2.9 Pendefinisian Masalah.....	23
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	24

3.1 Pendekatan Umum	24
3.2 Desain Penelitian	24
3.3 Diagram Alir Penelitian	25
3.4 Persiapan Sampel	26
3.5 Pengujian Eksperimental.....	28
3.6 Pemodelan 3D Osteokondral.....	29
3.7 Pendekatan Metode Elemen Hingga	31
3.8 Penentuan Kondisi Batas.....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Data Hasil Uji Eksperimental.....	34
4.2 Data Hasil Pengukuran Instantaneous Modulus dan Stiffness.....	34
4.3 Data Hasil Simulasi.....	35
4.4 Validasi Eksperimental Dan Simulasi.....	36
4.5 Analisis Pengaruh Pembebanan Tekan Terhadap Distribusi Tegangan	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	38
5.1 Kesimpulan	38
5.2 Saran.....	38
DAFTAR PUSTAKA.....	39

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1. Diagram alir proses pemilihan jurnal	7
Gambar 2.2. Perpindahan beban pada persendian lutut	12
Gambar 2.3. Zona lapisan di tulang rawan	13
Gambar 2.4. Perubahan bentuk pada tulang akibat pembebanan	15
Gambar 2.5. Struktur kerangka tubuh manusia	16
Gambar 2.6. Penampang tibial yang menunjukkan lapisan tulang rawan artikular, tulang subkondral dan tulang kanselus	18
Gambar 2.7. Ilustrasi permukaan lapisan tulang rawan, tulang rawan kalsifikasi, subkondral, dan kanselus	18
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	26
Gambar 3.2. Tulang osteokondral sapi	27
Gambar 3.3. <i>Region of Interest</i> (ROI) pada sampel oskteokondral	27
Gambar 3.4. Hasil pemotongan sampel berukuran 30 x 20 x 10 mm pada area tibial plateau lateral	28
Gambar 3.5. (a) Sampel direndam dalam pemanas ultrasonik (b) Pemeriksaan pada permukaan tulang rawan	28
Gambar 3.6. Pengujian Eksperimental	29
Gambar 3.7. (a) Data gambar hasil μ CT Scan (b) Peta gambar 413 lapisan	29
Gambar 3.8. Tahapan skematik pengolahan data gambar 3D osteokondral	30
Gambar 3.9. Hasil rekonstruksi model 3D osteokondral	31
Gambar 3.10. Model elemen hingga osteokondral dengan mesh tetrahedral ...	32
Gambar 3.11. Kondisi batas model 3D tulang osteokondral	33

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1. Kriteria inklusi dan eksklusi menggunakan PICO	6
Tabel 2.2. Referensi penelitian.....	7
Tabel 3.1. Validasi material properties yang digunakan dalam penelitian ini .	32
Tabel 4.1. Data tebal tulang rawan dari hasil uji eksperimental	34

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
σ :	Tegangan	MPa
σ_v :	Tegangan von Mises	MPa
σ_y :	Kekuatan Luluh	MPa
F :	Beban Yang Diberikan	Newton
A_0 :	Luas Penampang Mula - Mula	mm ²
ε :	Regangan	mm/mm
Δl :	Perubahan Panjang	mm
l_0 :	Panjang Mula-Mula	mm
l :	Panjang Setelah Diberi Gaya	mm
E :	Modulus Elastisitas	MPa
K^2 :	Tegangan Luluh	MPa

ANALISIS PENGARUH PEMBEBANAN TEKAN TERHADAP DISTRIBUSI TEGANGAN PADA STRUKTUR PERMUKAAN TULANG RAWAN

Dicky Pratama Putra⁽¹⁾, Hasan Basri⁽¹⁾, Irsyadi Yani⁽¹⁾, Hendri Chandra⁽¹⁾,
Agung Mataram⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indralaya
30662, Ogan Ilir, Sumatera Selatan, Indonesia
Email: hasan_basri@unsri.ac.id

Abstrak

Studi ini bertujuan untuk mengukur nilai modulus elastisitas yang bergantung pada zona dari jaringan tulang rawan artikular menggunakan teknik pengujian indentasi dengan menerapkan pembebanan tekan pada struktur permukaan tulang rawan (osteokondral) untuk mengidentifikasi distribusi tegangan yang terjadi dan parameter material lainnya sebagai referensi penunjang terkait dengan studi rekayasa jaringan pada desain implan perancah tulang. Salah satu metode pengukuran yang cepat untuk memprediksi distribusi pembebanan pada struktur permukaan dari tulang rawan adalah dengan teknik pengujian indentasi. Metode yang digunakan dalam studi ini berupa tinjauan sistematis untuk meninjau setiap desain studi dengan bukti eksperimental untuk menilai distribusi tegangan dengan pembebanan tekan pada struktur permukaan tulang rawan tibial plateau lateral dengan teknik indentasi, dan metode pendekatan simulasi elemen hingga untuk memvalidasi dan membandingkan model hasil uji eksperimental dari sampel osteokondral bagian lateral tulang sapi daerah tibial plateau. Hasil simulasi menunjukkan bahwa besarnya tegangan kompresive yang diakibatkan oleh pembebanan berupa *displacement* hasil eksperimental sebesar 0.2 mm adalah 0.00035 MPa. Sedangkan, pada hasil simulasi tegangan maksimum von Mises didapatkan sebesar 0.000324 MPa sehingga nilai validasi yang didapatkan dari perbandingan uji eksperimental dan simulasi sebesar 7.4286%. Berdasarkan analisis pengaruh pembebanan tekan terhadap distribusi tegangan dapat disimpulkan dari variasi model yang telah disimulasikan, bahwa semakin besar porositas yang berada pada tulang cancellous maka distribusi tegangan ditulang kanselus akan semakin tinggi.

Kata kunci: Tulang rawan artikular, sifat mekanik, uji indentasi, pembebanan tekan, tinjauan sistematis

ANALYSIS OF THE EFFECT OF COMPRESSIVE LOADING ON STRESS DISTRIBUTION IN THE SURFACE STRUCTURE OF CARTILAGE

Dicky Pratama Putra⁽¹⁾, Hasan Basri⁽¹⁾, Irsyadi Yani⁽¹⁾, Hendri Chandra⁽¹⁾,
Agung Mataram⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Indralaya
30662, Ogan Ilir, Sumatera Selatan, Indonesia
Email: hasan_basri@unsri.ac.id

Abstract

This study aims to measure the zone-dependent elastic modulus value of articular cartilage tissue using indentation testing techniques by applying compressive loading to the cartilage surface structure (osteochondral) to identify the stress distribution that occurs and other material parameters as supporting references related to engineering studies. tissue on bone scaffold implant design. One of the fast measurement methods to predict the loading distribution on the surface structure of cartilage is the indentation testing technique. One of the fast measurement methods to predict the loading distribution on the surface structure of cartilage is the indentation testing technique. The method used in this study is a systematic review to review each study design with experimental evidence to assess the stress distribution under compressive loading on the surface structure of the lateral tibial plateau cartilage by indentation techniques, and the finite element simulation approach method to validate and compare the model experimental results. From an osteochondral sample of the lateral bovine bone at the tibial plateau. The simulation results show that the magnitude of the compressive stress caused by loading in the form of an experimental displacement of 0.2 mm is 0.00035 MPa. Meanwhile, the results of the von Mises maximum stress simulation were obtained at 0.000324 MPa so that the validation value obtained from the comparison of experimental tests and simulations was 7.4286%. Based on the analysis of the effect of compressive loading on the stress distribution, it can be concluded from the various models that have been simulated, that the greater the porosity in the cancellous bone, the stress distribution in the cancellous bone will be higher.

Keywords: Articular cartilage, mechanical properties, indentation test, compressive loading, systematic review

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Banyak penelitian yang dilakukan untuk membuktikan hubungan mekanisme terhadap kerusakan tulang rawan dimulai dari permukaan tulang rawan hingga meluas ke tulang di bawahnya yaitu, tulang subkondral dan karselus (G. Musumeci, 2016, dan S. H. Chang, et al., 2019). Mengenai hal ini, para ilmuwan saat ini sedang meneliti dan mengusulkan metode transplantasi *autograft* sebagai implan perancah tulang untuk merekonstruksi antarmuka lapisan pada tulang rawan dan subkondral dengan mengisi celah tulang rawan yang mengalami kerusakan (M. R. Steinwachs, et al., 2012, S. A. Johnson dan D. D. Frisbie, 2016, dan J. M. Patel, et al., 2019).

Dalam merekayasa jaringan fungsional perancah tulang, harus ada kekuatan mekanik yang sesuai dalam mendukung pembuatan implan perancah tulang (Guilak F., et al, 2001), oleh sebab itu sifat mekanik perancah tulang harus sesuai dengan jaringan yang ditargetkan dalam pembuatan implan perancah tulang (Hutmacher DW, 2000). Membuat implan perancah seperti itu dapat menjadi hal cukup yang rumit, dikarenakan sebagian besar jaringan tulang tidak homogen dan memiliki sifat mekanik yang bervariasi di setiap struktur tulang itu sendiri. Seiring dengan perkembangan jaman, muncul teknologi pencetakan 3D seperti biofabrikasi (Mouser VHM., et al, 2016) *melt electrospinning writing* (MEW) (Brown TD., et al, 2015) dan *fused deposition moulding* (Chia HN dan Wu BM., 2015) yang membantu dalam pembuatan implan perancah tulang yang dapat memproduksi sifat mekanik secara lokal yang digunakan sebagai pengganti jaringan tulang.

Tulang rawan artikular adalah salah satu contoh jaringan yang tidak homogen, di mana sifat mekanik dapat berubah tergantung pada tingkat kedalaman jaringannya. Gradien dari modulus elastisitas tulang rawan dipengaruhi oleh variasi komposisi jaringan tulang rawan itu sendiri (Jeon J., et al 2010). Pada tingkat kedalaman jaringan, tulang rawan dibagi menjadi empat zona utama, yaitu: (a) zona superfisial (10–20%); (b) zona tengah (40–60%); (c) zona dalam (20–50%); dan (d) zona kalsifikasi.

Antarmuka lapisan antara zona dalam dan zona kalsifikasi adalah tanda air, sedangkan antarmuka lapisan antara zona kalsifikasi dan tulang subkondral disebut

dengan *cement line*. Empat zona utama pada tulang rawan artikular ini digunakan sebagai gambaran proporsinya pada persentase tingkat kedalaman jaringan tulang secara keseluruhan (Athanasίου KA., et al, 2009).

Meskipun sifat mekanik tulang rawan telah dipelajari secara ekstensif, sebagian besar studi difokuskan pada sifat mekanik keseluruhan yang diukur dari jaringan atas yaitu, zona lapisan tulang rawan artikular (Laasanen MS., et al, 2003). Beberapa studi ditemukan, membahas tentang rekayasa jaringan secara lokal pada sifat mekanik tulang rawan artikular di zona yang berbeda (Ebenstein DM., et al. 2011). Dalam studi lainnya pengukuran jaringan pada zona lapisan tulang rawan articular untuk menentukan sifat mekanik pada zona tulang rawan artikular dilakukan dengan metode pengukuran yang berbeda, yaitu dengan teknik *atomic force microscopy* (Tomkoria S., et al, 2005) atau *specialized compression setups* (Chen AC., et al, 2001). Metode ini cukup sulit dilakukan secara teknis, namun kelangkaan data dari sifat mekanik zona tulang rawan dapat dijelaskan dari jenis pengukuran ini.

Dibandingkan metode *atomic force microscopy* atau *specialized compression setups* yang sulit dilakukan secara teknis dalam pengukurannya, ada salah satu metode pengukuran yang cepat untuk memprediksi sifat mekanik dari tulang rawan, yaitu teknik pengujian indentasi. Metode ini memungkinkan pengukuran dapat dilakukan pada area yang luas dan lebih efisien dalam menjelaskan ketergantungan sifat mekanik terhadap kekakuan dari setiap zona pada tulang rawan.

Pengujian indentasi adalah teknik yang umum digunakan untuk menentukan sifat mekanik tulang rawan artikular dengan cara menerapkan pembebanan tekan terhadap model kontak karena sifat pengujiannya yang tidak merusak dan cocok untuk pengujian sambungan kecil (*small joint*) pada sendi dengan jumlah jaringan yang terbatas (Chen, X., B.K. Zimmerman dan X.L. Lu, 2015) Untuk mendapatkan sifat mekanik dari data indentasi, model konstitutif digunakan untuk menggambarkan perilaku mekanis tulang rawan terhadap responnya. Namun kekurangan dari metode pengukuran ini, yaitu dalam mencari solusi secara teoritis cukup sulit untuk dikembangkan dikarenakan kompleksitas pada kondisi batas, terutama untuk model konstitutif yang komprehensif (Chen, X., et al, 2015). Ketika tulang rawan diberi perilaku mekanis sebagai bahan *linear elastic*, solusi kontak

Hertzian dengan asumsi ruang euklides (ruang dalam jumlah dimensi yang terbatas) atau setengah bidang diterapkan saat pengukuran dilakukan dengan teknik pengujian indentasi nano atau mikro (Li, Q., et al, 2015). Sedangkan, untuk pengukuran dengan teknik pengujian indentasi skala besar, sering menerapkan solusi Hayes, karena asumsi ruang euklides pada solusi Hertzian diabaikan saat pengukuran dilakukan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur nilai modulus elastisitas yang bergantung pada zona dari jaringan tulang rawan artikular menggunakan teknik pengujian indentasi dengan menerapkan pembebanan tekan pada struktur permukaan tulang rawan (osteokondral) untuk mengevaluasi distribusi tegangan yang terjadi pada tulang rawan dan menentukan sifat mekanik, serta parameter material lainnya sebagai referensi penelitian berikutnya terkait dengan rekayasa jaringan pada desain implan perancah tulang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, adapun rumusan masalah dalam penelitian ini, adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana distribusi tegangan yang terjadi akibat pembebanan tekan terhadap struktur permukaan tulang rawan?
2. Bagaimana hubungan pembebanan tekan dan struktur permukaan tulang rawan sehingga mempengaruhi lapisan-lapisan tulang dibawahnya?

1.3 Pernyataan Masalah

Metode transplantasi *autograft* sebagai implan perancah tulang mungkin telah membantu mengurangi rasa sakit dan mengisi celah tulang rawan yang mengalami kerusakan. Namun, masih ada masalah yang belum terselesaikan. Contohnya pada atlet, setelah dirawat dari cedera, mereka mengalami kesulitan untuk kembali ke aktivitas normal mereka sebagai atlet (M. R. Steinwachs, et al., 2012).

Ditemukan bahwa jumlah atlet yang dapat kembali berolahraga setelah pra-cedera lebih rendah dibandingkan dengan jumlah atlet yang dirawat untuk pemulihan akibat kerusakan tulang rawan (J. D. Harris, et al., 2010). Hal ini disebabkan oleh faktor-faktor seperti rehabilitasi yang berkepanjangan dan

pencangkakan implan perancah tulang yang tidak sesuai yang menyebabkan tulang rawan tidak dapat menempel kembali dan beregenerasi.

Oleh karena itu, tulang rawan yang mengalami kerusakan tidak dapat sepenuhnya diperbaiki. Untuk mengimprovisasi perawatan medis saat ini, penting untuk memahami faktor mekanobiologis yang menjadi awal kerusakan tulang rawan. Karena tidak hanya tulang rawan yang ditemukan berpengaruh selama proses kerusakan terjadi, tetapi tulang di bawahnya mungkin berperan dalam mencapai homeostasis (proses dan mekanisme pemulihan otomatis) pada tulang rawan. Untuk menangani hal ini, maka perlu untuk mengembangkan dan melihat faktor lain sebagai informasi tambahan, salah satunya dengan menganalisis pengaruh pembebanan tekan terhadap distribusi tegangan pada struktur permukaan tulang rawan tibial plateau lateral. Pada bagian ini sering kali terjadi fraktur (patah tulang) dikarenakan tulang menerima tekanan atau benturan yang kekuatannya lebih besar daripada kekuatan tulang itu sendiri, hal ini disebabkan oleh aktifitas fisik yang dilakukan dalam kehidupan sehari-hari.

1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam laporan tesis ini tidak melebar sehingga terfokus pada tujuan utama penelitian, untuk itu disusunlah suatu batasan masalah dalam penulisannya, yaitu:

1. Sampel yang digunakan adalah tulang rawan tibial plateau lateral sapi dalam kondisi sehat berukuran 30 x 20 x 10 mm karena komparabilitas mikro morfologinya mendekati tulang manusia.
2. Eksperimental dilakukan dengan uji indentasi (tekan) untuk menentukan sifat mekanik dan parameter material tulang lainnya pada tulang rawan sapi (osteokondral).
3. Pendekatan simulasi dilakukan guna untuk memvalidasi dan membandingkan model hasil uji eksperimental dari sampel osteokondral bagian lateral tulang sapi daerah tibial plateau.
4. Model 3D sampel tulang untuk kebutuhan simulasi dibentuk dari hasil X-ray *micro-computed tomography* (μ CT) dari tulang osteokondral sapi berukuran 30

x 20 x 10 mm yang direkonstruksi dengan perangkat lunak *ImageJ* dan *Mimics Research*.

5. Model osteokondral diasumsikan union, setiap objek yang kontak akan menjadi objek tunggal yang terdiri dari domain yang berbeda untuk setiap volume tertutup.
6. Simulasi dengan pendekatan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *Comsol Multiphysics 6.0*.

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi hubungan antara distribusi tegangan terhadap pembebanan tekan yang diaplikasikan pada struktur permukaan tulang rawan (osteokondral) berdasarkan representasi beban fisiologis yang terdiri dari lapisan tulang rawan, subkondral, dan kanselus.
2. Mengidentifikasi pusat konsentrasi tegangan akibat pembebanan tekan yang diterapkan pada struktur permukaan lapisan tulang rawan (osteokondral).
3. Memprediksi sifat mekanik tulang rawan (osteokondral) sebagai referensi penelitian berikutnya terkait dengan desain implan perancah tulang.

1.6 Manfaat Penelitian

1. Mengeksplorasi berbagai penerapan ilmu biomekanika di bidang Teknik Mesin khususnya pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
2. Riset tentang analisis pengaruh pembebanan tekan terhadap distribusi tegangan pada struktur permukaan tulang rawan tibial plateau lateral dapat membantu dalam mengetahui sifat mekanik unit osteokondral guna untuk menunjang pembuatan implan perancah tulang kedepannya.
3. Sebagai acuan untuk dijadikan sebagai referensi bagi peneliti yang mengambil studi kasus yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

- Gede Kambayana. (2017). *Managemen Rasional Osteoarthritis dan Osteoporosis*. Divisi Reumatologi-imunologi Bag/SMF Ilmu Penyakit Dalam, FK UNUD/RSUP Sanglah Denpasar Bali. Ikatan Rematologi Indonesia, National Rheumatology Osteoporosis & Herbal Medicine Update IV 2017.
- da Cunha Cavalcanti, F. M., Doca, D., Cohen, M., dan Ferretti, M. (2015). Updating on Diagnosis and Treatment of Chondral Lesion of the Knee. *Revista brasileira de ortopedia*, 47(1), 12–20. [https://doi.org/10.1016/S2255-4971\(15\)30339-6](https://doi.org/10.1016/S2255-4971(15)30339-6).
- Robinson, D. L., Kersh, M. E., Walsh, N. C., Ackland, D. C., de Steiger, R. N., dan Pandya, M. G. (2016). Mechanical properties of normal and osteoarthritic human articular cartilage. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 61, 96–109. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.01.015>.
- Pap, T., Korb-Pap, A. Cartilage damage in osteoarthritis and rheumatoid arthritis—two unequal siblings. *Nat Rev Rheumatol* 11, 606–615 (2015). <https://doi.org/10.1038/nrrheum.2015.95>.
- Peters, A. E., Akhtar, R., Comerford, E. J. et al. The effect of ageing and osteoarthritis on the mechanical properties of cartilage and bone in the human knee joint. *Sci Rep* 8, 5931 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24258-6>.
- Chang, S. H., Mori, D., Kobayashi, H. et al. Excessive mechanical loading promotes osteoarthritis through the gremlin-1–NF- κ B pathway. *Nat Commun* 10, 1442 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09491-5>.
- Zhu, J., Zhu, Y., Xiao, W., Hu, Y., & Li, Y. (2020). Instability and excessive mechanical loading mediate subchondral bone changes to induce osteoarthritis. *Annals of translational medicine*, 8(6), 350. <https://doi.org/10.21037/atm.2020.02.103>.
- Intema, F., Hazewinkel, H. A., Gouwens, D., Bijlsma, J. W., Weinans, H., Lafeber, F. P., dan Mastbergen, S. C. (2010). In early OA, thinning of the subchondral plate is directly related to cartilage damage: results from a

- canine ACLT-meniscectomy model. *Osteoarthritis and cartilage*, 18(5), 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.joca.2010.01.004>.
- Neogi, T., 2012. “Clinical significance of bone changes in osteoarthritis. Therapeutic advances in musculoskeletal disease.” 4(4), 259–267. <https://doi.org/10.1177/1759720X12437354>.
- Wolff J., 1986. “The Law of Bone Remodeling.” Springer: Berlin Heidelberg New York.
- Ding, M., Odgaard, A., dan Hvid, I. (2003). Changes in the three-dimensional microstructure of human tibial cancellous bone in early osteoarthritis. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 85(6), 906–912.
- Lowitz, T., Museyko, O., Bousson, V., Kalender, W. A., Laredo, J. D., & Engelke, K. (2014). Characterization of knee osteoarthritis-related changes in trabecular bone using texture parameters at various levels of spatial resolution—a simulation study. *BoneKEY reports*, 3, 615. <https://doi.org/10.1038/bonekey.2014.110>.
- Budgen, D dan Brereton, P. (2006). Performing systematic literature reviews in software engineering. In *Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering, ICSE '06*, pages 1051–1052, New York, NY, USA, 2006. ACM. ISBN 1-59593-375-1. doi:10.1145/1134285.1134500.
- Denise M. Rousseau, Joshua Manning, and David Denyer. Evidence in management and organizational science: Assembling the full weight of scientific knowledge through syntheses. *The Academy of Management Annals*, 2(1):475–515, 2008. doi:10.1080/19416520802211651.
- Lusiana dan Suryani, M, “Metode SLR untuk Mengidentifikasi Isu-Isu dalam Software Engineering,” *SATIN (Sains dan Teknol. Informasi)*, vol. 3, no. 1, 2014.
- B. R. Barricelli, F. Cassano, D. Fogli, and A. Piccinno, “End-user development, end-user programming and end-user software engineering: A systematic mapping study,” *J. Syst. Softw.*, vol. 149, pp. 101–137, Mar. 2019.
- M. Razavian, B. Paech, and A. Tang, “Empirical research for software architecture decision making: An analysis,” *J. Syst. Softw.*, vol. 149, pp. 360–381, 2019.

- R. T. S. Hariyati, "Mengenal Systematic Review Theory dan Studi Kasus," *J. Keperawatan Indones.*, vol. 13, no. 2, pp. 124–132, 2010.
- Soekidjo Notoatmodjo, 2005, *Metodologi Penelitian Kesehatan*, Jakarta: PT. Rineka Cipta.
- Bach, R.B., D.B. Burr, and N.A. Sharkey (2010). *Skeletal Tissue Mechanics*: Springer New York.
- Samuel, S.P., G.R. Baran, Y. Wei, and B.L. Davis (2009). *Biomechanics – Part II*, in J.S. Khurana, Editor. *Bone Pathology*.(p. 69-77). Humana Press: Totowa, NJ.
- Wolff, J., P. Maquet, and R. Furlong (1986). *The law of bone remodelling*: Springer-Verlag.
- B. J. A. Lankester, H. L. Cottam, V. Pinskerova, J. D. J. Eldridge, and M. A. R. Freeman, "Variation in the anatomy of the tibial plateau," *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 90-B, no. 3, pp. 330–333, Mar. 2008.
- Khurana, J.S. (2009). *Bone Pathology*: Humana Press.
- Liu, X. S., Sajda, P., Saha, P. K., Wehrli, F. W., dan Guo, X. E., 2006. "Quantification of the Roles of Trabecular Microarchitecture and Trabecular Type in Determining the Elastic Modulus of Human Trabecular Bone." *J. Bone Miner. Res.*, 21 (10), pp. 1608-1617.
- B. Pouran, V. Arbabi, R. L. Bleys, P. René van Weeren, A. A. Zadpoor, and H. Weinans, "Solute transport at the interface of cartilage and subchondral bone plate: Effect of micro-architecture," *J. Biomech.*, vol. 52, pp. 148–154, Feb. 2017.
- B. T. Graham, A. C. Moore, D. L. Burris, and C. Price, "Sliding enhances fluid and solute transport into buried articular cartilage contacts," *Osteoarthr. Cartil.*, vol. 25, no. 12, pp. 2100–2107, Dec. 2017.
- R. C. Evans and T. M. Quinn, "Dynamic Compression Augments Interstitial Transport of a Glucose-Like Solute in Articular Cartilage," *Biophys. J.*, vol. 91, no. 4, pp. 1541–1547, Aug. 2006.
- J. A. Buckwalter, H. J. Mankin, A. J. Grodzinsky, and M. Doherty, "Articular cartilage and osteoarthritis," *Instr. Course Lect.*, vol. 54, no. 9, pp. 465–80, Sep. 2005.

- A. Sharma, S. Jagga, S.-S. Lee, and J.-S. Nam, “Interplay between Cartilage and Subchondral Bone Contributing to Pathogenesis of Osteoarthritis,” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 14, no. 10, pp. 19805–19830, Sep. 2013.
- A. J. Sophia Fox, A. Bedi, and S. A. Rodeo, “The basic science of articular cartilage: Structure, composition, and function,” *Sports Health*, vol. 1, no. 6, pp. 461–468, 2009.
- S. Koo and T. P. Andriacchi, “The knee joint center of rotation is predominantly on the lateral side during normal walking,” *J. Biomech.*, vol. 41, no. 6, pp. 1269–1273, 2008.
- B. T. Graham, A. C. Moore, D. L. Burris, and C. Price, “Mapping the spatiotemporal evolution of solute transport in articular cartilage explants reveals how cartilage recovers fluid within the contact area during sliding,” *J. Biomech.*, vol. 71, pp. 271–276, Apr. 2018.
- R. W. Kang, N. A. Friel, J. M. Williams, B. J. Cole, and M. A. Wimmer, “Effect of Impaction Sequence on Osteochondral Graft Damage: The Role of Repeated and Varying Loads,” *Am. J. Sports Med.*, vol. 38, no. 1, pp. 105–113, Jan. 2010.
- R. A. Whiteside, R. P. Jakob, U. P. Wyss, and P. Mainil-Varlet, “Impact loading of articular cartilage during transplantation of osteochondral autograft,” *J. Bone Joint Surg. Br.*, vol. 87-B, no. 9, pp. 1285–1291, Sep. 2005.
- R. U. Repo and J. B. Finlay, “Survival of articular cartilage after controlled impact,” *J. Bone Joint Surg. Am.*, vol. 59, no. 8, pp. 1068–76, Dec. 1977.
- P. A. Torzilli, R. Grigiene, J. Borrelli, and D. L. Helfet, “Effect of impact load on articular cartilage: cell metabolism and viability, and matrix water content,” *J. Biomech. Eng.*, vol. 121, no. 5, pp. 433–41, Oct. 1999.
- D. T. Felson, “Osteoarthritis as a disease of mechanics,” *Osteoarthr. Cartil.*, vol. 21, no. 1, pp. 10–15, 2013.
- Hildebrand, T., et al. (1999). Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: Microstructural data from spine, femur, iliac crest, and calcaneus. *Journal of Bone and Mineral Research*, 14(7), p. 1167-1174.
- Currey, J. (2012). The structure and mechanics of bone. *Journal of Materials*

- Science*, 47(1), p. 41-54.
- Kazama, J.J., et al. (2010). Cancellous Bone Volume Is an Indicator for Trabecular Bone Connectivity in Dialysis Patients. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, 5(2), p. 292-298.
- Hildebrand, T. and P. Rüegsegger (1997). A new method for the modelindependent assessment of thickness in three-dimensional images. *Journal of Microscopy*, 185(1), p. 67-75.
- Anderson, I.A. and J.B. Carman (2000). How do changes to plate thickness, length, and face-connectivity affect femoral cancellous bone's density and surface area? An investigation using regular cellular models. *Journal of Biomechanics*, 33(3), p. 327-335.
- Teo, J.C.M., K.M. Si-Hoe, J.E.L. Keh, and S.H. Teoh (2007). Correlation of cancellous bone microarchitectural parameters from microCT to CT number and bone mechanical properties. *Materials Science and Engineering: C*, 27(2), p. 333-339.
- M. Keeney and A. Pandit, "The Osteochondral Junction and Its Repair via Bi-Phasic Tissue Engineering Scaffolds," *Tissue Eng. Part B Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 55–73, Mar. 2009.
- C. Deng, J. Chang, and C. Wu, "Bioactive scaffolds for osteochondral regeneration," *J. Orthop. Transl.*, Dec. 2018.
- C. Liu, C. Liu, L. Si, H. Shen, Q. Wang, and W. Yao, "Relationship between subchondral bone microstructure and articular cartilage in the osteoarthritic knee using 3T MRI," *J. Magn. Reson. Imaging*, pp. 1–11, 2018.
- A. Syahrom, M. R. Abdul Kadir, J. Abdullah, and A. Öchsner, "Mechanical and microarchitectural analyses of cancellous bone through experiment and computer simulation," *Med. Biol. Eng. Comput.*, vol. 49, no. 12, pp. 1393–1403, Dec. 2011.
- Budianto dan Imron. A., 2016. Analisis Perilaku Struktur Forward Storage Platform dengan Pembebanan yang terjadi Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Techo Bahari*. Vol. 3, No. 2. ISSN:2406-8829.
- Wikipedia contributors. (2022, January 20). Von Mises yield criterion. In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 16:16, May 20, 2022,

from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Von_Mises_yield_criterion&oldid=1066875231

- Zhou F, Chu L, Liu X, He Z, Han X, Yan M, Qu X, Li X and Yu Z (2021) Subchondral Trabecular Microstructure and Articular Cartilage Damage Variations Between Osteoarthritis and Osteoporotic Osteoarthritis: A Cross-sectional Cohort Study. *Front. Med.* 8:617200. doi: 10.3389/fmed.2021.617200.
- Mountcastle, S. E., Allen, P., Mellors, B. O. L., Lawless, B. M., Cooke, M. E., Lavecchia, C. E., ... Cox, S. C. (2019). Dynamic viscoelastic characterisation of human osteochondral tissue: understanding the effect of the cartilage-bone interface. *BMC Musculoskeletal Disorders*, 20(1). doi:10.1186/s12891-019-2959-4.
- Hooi Yee Ng., Kai-Xing Alvin Lee., and Yu-Fang Shen (2017). Articular Cartilage: Structure, Composition, Injuries and Repair. *JSM Bone and Joint Dis* 1(2): 1010.
- Brody, L. T. (2015). *Knee osteoarthritis: Clinical connections to articular cartilage structure and function. Physical Therapy in Sport*, 16(4), 301–316. doi:10.1016/j.ptsp.2014.12.001
- Horikawa, A., Miyakoshi, N., Shimada, Y., & Kodama, H. (2014). The Relationship between Osteoporosis and Osteoarthritis of the Knee: A Report of 2 Cases with Suspected Osteonecrosis. *Case Reports in Orthopedics*, 2014, 1–6.
- Fujioka, R., Aoyama, T., and Takakuwa, T (2013). The layered structure of the articular surface. *Osteoarthritis and Cartilage*, 21(8), 1092–1098. doi:10.1016/j.joca.2013.04.021.
- S. Majumdar *et al.*, “High-resolution magnetic resonance imaging: Three-dimensional trabecular bone architecture and biomechanical properties,” *Bone*, 1998.
- A. Odgaard, “Three-dimensional methods for quantification of cancellous bone architecture,” *Bone*. 1997.
- Md Saad, A.P., Jasmawati, N., Harun, M.N., Abdul Kadir, M.R., Nur, H., Hermawan, H., Syahrom, A., 2016. Dynamic degradation of porous

magnesium under a simulated environment of human cancellous bone.
Corrosion Science, 112, 495–
506.<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.08.017>