

STUDI BIOKOMPATIBILITAS IMPLAN LOGAM YANG DILAPISI MEMBRAN ELEKTROSPUN *POLYCAPROLACTON* DENGAN BIOAKTIF ESTRADIOL PADA DOMBA GARUT

ALI OMAR ALAHMAD



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU BIOMEDIS HEWAN
PEMINATAN ILMU BIOMEDIS HEWAN
SEKOLAH KEDOKTERAN HEWAN DAN BIOMEDIS
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini Saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Studi Biokompatibilitas Implan Logam Yang Dilapisi Membran Elektrospun *Polycaprolacton* Dengan Bioaktif Estradiol Pada Domba Garut” adalah karya Saya dengan arahan dari dosen Pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada Perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari Penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini Saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis Saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Ali Omar Alahmad
B3501241801



RINGKASAN

ALI OMAR ALAHMAD. Studi Biokompatibilitas Implan Logam Yang Dilapisi Membran Elektrospon Polycaprolacton Dengan Bioaktif Estradiol Pada Domba Garut. Dibimbing oleh DENI NOVIANA, GUNANTI, dan MOKHAMAD FAKHRUL ULUM.

Keberhasilan implan ortopedi sangat dipengaruhi oleh biokompatibilitas dan kemampuan material dalam mendukung osseointegrasi pada fase awal penyembuhan tulang. Modifikasi permukaan implan logam menggunakan membran biodegradable yang dikombinasikan dengan molekul bioaktif merupakan strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan respons biologis implan. *Polycaprolactone* (PCL) merupakan polimer *biodegradable* dengan biokompatibilitas yang baik, sedangkan estradiol berperan dalam meningkatkan aktivitas osteoblas dan menghambat resorpsi tulang. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi biokompatibilitas serta respons biologis awal implan logam yang dilapisi membran elektrospon PCL dan PCL–Estradiol (PCL-ES) pada model domba Garut. Sebanyak delapan ekor domba Garut jantan sehat berumur 8 – 14 bulan digunakan dalam penelitian ini. Defek tulang dibuat pada kedua tibia dan dibagi ke dalam empat kelompok perlakuan, yaitu Sham (defek tanpa implan), Bare (implan logam tanpa pelapis), PCL (implan berlapis *polycaprolactone*), dan PCL-ES (implan berlapis *polycaprolactone*–estradiol). Hewan diamati selama 56 hari pascaimplantasi melalui evaluasi makroskopis penyembuhan luka, ultrasonografi, radiografi kuantitatif berbasis nilai grayscale, analisis hematologi, dan pemeriksaan biokimia serum. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penyembuhan luka berlangsung baik pada seluruh kelompok tanpa komplikasi, dengan penutupan luka hampir sempurna pada hari ke-56. Ketebalan jaringan lunak, pembengkakan, serta densitas radiografis antarmuka tulang–implan dipengaruhi secara signifikan oleh kelompok perlakuan dan waktu pengamatan ($p < 0,05$). Kelompok PCL-ES menunjukkan respons inflamasi lokal yang lebih rendah dan perkembangan osseointegrasi yang lebih baik dibandingkan kelompok lainnya. Seluruh parameter hematologi tetap berada dalam kisaran fisiologis normal tanpa menunjukkan toksisitas sistemik, sedangkan analisis biokimia menunjukkan perubahan kadar fosfor, kalsium, dan magnesium yang berkaitan dengan *proses remodeling* tulang. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa membran elektrospon PCL–Estradiol memiliki biokompatibilitas yang baik, mampu mempercepat penyembuhan jaringan lunak, mengurangi respons inflamasi lokal, serta meningkatkan osseointegrasi tanpa menimbulkan gangguan sistemik. Membran ini berpotensi menjadi strategi modifikasi permukaan yang efektif untuk meningkatkan kinerja implan ortopedi *biodegradable*.

Kata kunci: biokompatibilitas, elektrospon, estradiol, implan logam, osseointegrasi,

SUMMARY

ALI OMAR ALAHMAD. Biocompatibility Study of Metal Implants Coated with Electrospun Polycaprolactone Membranes Containing Bioactive Estradiol in Garut Sheep. Supervised by DENI NOVIANA, GUNANTI, and MOKHAMAD FAKHRUL ULUM.

The success of orthopedic implants depends on their biocompatibility and ability to support early bone healing and osseointegration. Surface modification of metallic implants using biodegradable membranes functionalized with bioactive molecules has emerged as a promising strategy to enhance implant performance. Polycaprolactone (PCL) is a biodegradable polymer with excellent biocompatibility, while estradiol promotes osteoblast activity and inhibits bone resorption. This study evaluated the biocompatibility and early biological response of metallic implants coated with electrospun PCL and estradiol-functionalized electrospun PCL (PCL-ES) using a Garut sheep model. Eight healthy male Garut sheep (8–14 months old) were assigned to four treatment groups: Sham (bone defect without implant), Bare (uncoated metallic implant), PCL (PCL-coated implant), and PCL-ES (PCL–estradiol-coated implant). Circular bone defects were surgically created in both tibiae, and the animals were monitored for 56 days. Evaluations included macroscopic wound healing, ultrasonography, quantitative grayscale-based radiography, hematological analysis, and serum biochemical assessment. All groups exhibited satisfactory wound healing without infection, dehiscence, or exudate, with nearly complete wound closure by Day 56. Soft tissue thickness was significantly affected by implant type and observation time (both $p < 0.001$), while the PCL and particularly the PCL-ES groups showed reduced local inflammatory responses compared with the Sham group. Ultrasonography demonstrated significant effects of time ($p < 0.001$), treatment group ($p = 0.017$), and their interaction ($p = 0.021$) on peri-implant soft tissue swelling. Radiographic analysis revealed significant differences in bone–implant interface density among treatment groups ($p < 0.001$) with a significant group $\times$ time interaction ($p = 0.012$). Implant radiographic density was also significantly influenced by treatment group ($p < 0.001$) and group $\times$ time interaction ($p = 0.004$). The PCL-ES group exhibited radiographic findings consistent with enhanced bone healing. Hematological parameters remained within normal physiological ranges throughout the study, indicating the absence of systemic toxicity. Serum phosphorus levels were affected by observation time, whereas calcium and magnesium levels were significantly influenced by implant type and were associated with bone remodeling. In conclusion, estradiol-functionalized electrospun PCL membranes demonstrated excellent biocompatibility, promoted soft tissue healing, reduced local inflammatory responses, and enhanced bone healing without inducing systemic adverse effects. These findings suggest that electrospun PCL–Estradiol membranes are a promising surface modification strategy for improving the performance of biodegradable orthopedic implants.

Keywords: *biocompatibility, electrospinning, estradiol, metallic implant, osseointegration, polycaprolactone*

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

**STUDI BIOKOMPATIBILITAS IMPLAN LOGAM YANG
DILAPISI MEMBRAN ELEKTROSPUN *POLYCAPROLACTON*
DENGAN BIOAKTIF ESTRADIOL PADA DOMBA GARUT**

ALI OMAR ALAHMAD

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Sains pada Program Studi Ilmu Biomedis Hewan

**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU BIOMEDIS HEWAN
PEMINATAN ILMU BIOMEDIS HEWAN
SEKOLAH KEDOKTERAN HEWAN DAN BIOMEDIS
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

@Hak cipta milik IPB University

IPB University





@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
1 Drh. Leni Maylina MS.i, Ph.D



Judul : Studi Biokompatibilitas Implan Logam yang Dilapisi Membran Elektrospon *Polycaprolacton* dengan Bioaktif Estradiol pada Domba Garut
Nama : Ali Omar Alahmad
NRP : B3501241801

Disetujui oleh:

Pembimbing 1:
Prof. drh. Deni Noviana, Ph.D, DAiCVIM



Pembimbing 2:
Prof. Dr. drh. Gunanti, M.S



Pembimbing 3:
drh. Mokhamad Fakhrol Ulum , M.Si.,Ph.D.



Diketahui oleh:

Ketua Program Studi:
Prof. drh. Bambang Pontjo Priosoeryanto, M.S.
Ph.D, APVet, DACCM
NIP. 196002281986011001

Dekan Sekolah Kedokteran Hewan dan Biomedis:
Prof. drh. Amrozi, Ph.D
NIP 197007211995121001

Tanggal Ujian: 4 Agustus 2026

Tanggal Pengesahan:



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University



PRAKATA

Puji dan syukur Penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak Oktober 2025 hingga Januari 2026 dengan tema biokompatibilitas implan logam berlapis membran elektrospon polycaprolactone yang difungsionalisasi dengan estradiol bioaktif, dengan judul *“Biocompatibility Study of Metal Implants Coated with Electrospun Polycaprolactone Membranes Functionalized with Bioactive Estradiol in Garut Sheep”* Terima kasih Penulis ucapkan kepada para Pembimbing, Prof. drh. Deni Noviana, Ph.D, DAiCVIM, Prof. Dr. drh. Gunanti, M.S dan drh. Mokhamad Fakhrol Ulum, M.Si.,Ph.D selaku dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, memberikan bimbingan, arahan, motivasi, serta saran yang sangat berharga selama proses penelitian hingga penyusunan tesis ini.

Ucapan terima kasih juga Penulis sampaikan kepada seluruh dosen dan tenaga kependidikan di Sekolah Pascasarjana IPB, khususnya Departemen Ilmu Biomedis Hewan, IPB University, atas ilmu, bantuan, dan dukungan yang diberikan selama masa studi. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh staf laboratorium serta semua pihak yang telah membantu selama pelaksanaan penelitian, pengambilan data, dan penyelesaian tesis ini. Penghargaan yang tulus penulis sampaikan kepada Pemerintah Republik Indonesia melalui program Beasiswa Kemitraan Negara Berkembang (KNB) atas dukungan pembiayaan selama masa studi di IPB University. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan izin, fasilitas, dan bantuan selama penelitian berlangsung. Ungkapan terima kasih yang paling dalam Penulis persembahkan kepada Ayah, Ibu, seluruh anggota keluarga, serta semua sahabat yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, motivasi, dan dukungan moral selama menempuh pendidikan dan menyelesaikan penelitian ini.

Semoga tesis ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang biomaterial, bedah ortopedi veteriner, dan kedokteran regeneratif, serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Bogor, Agustus 2026

Ali Omar Alahmad



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Signifikansi Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Hipotesis Penelitian	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Biokompatibilitas Implan Logam	5
2.2 Implan Logam <i>Biodegradable</i>	6
2.2.1 Paduan Berbasis Seng	6
2.2.2 Paduan Seng-Mangan	6
2.3 <i>Polycaprolactone</i> (PCL) sebagai Material Pelapis <i>Biodegradable</i>	7
2.4 Peran Estradiol terhadap Kesehatan Tulang	8
2.5 Membran <i>Polycaprolactone</i> (PCL)-Estradiol (PCL-Es) untuk Regenerasi Tulang	9
2.6 Membran Elektrospon dan Perannya dalam Regenerasi Tulang	9
III METODOLOGI PENELITIAN	11
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	11
3.2 Fabrikasi Implan Logam Berlapis Membran Elektrospon <i>polycaprolactone</i> (PCL) dan PCL-Estradiol (PCL-ES)	11
3.2.1 Bahan yang Digunakan	11
3.2.2 Preparasi Implan Logam Zn-2,4 wt% Mn	12
3.2.3 Pembuatan Membran Elektrospon <i>polycaprolactone</i> (PCL) dan PCL-Estradiol (PCL-ES)	12
3.3 Model Hewan dan Pengelompokan:	13
3.4 Prosedur Operasi	13
3.5 Evaluasi Penyembuhan Luka	15
3.6 Evaluasi Radiografi	16
3.7 Pemeriksaan Ultrasonografi	16
3.8 Pengambilan dan Analisis Hematologi Lengkap	17
3.8.1 Pengambilan Sampel Darah	17
3.8.2 Analisis Hematologi	18
3.8.3 Analisis Biokimia Serum	18
3.9 Analisis Statistik	19
IV HASIL PENELITIAN	20
4.1 Evaluasi Makroskopis Penyembuhan Luka Lokal	20
4.2 Evaluasi Radiografis Densitas Tulang dan Implan	22



4.2.1 Densitas Radiografis Antarmuka Tulang–Implan	22
4.2.2 Densitas Radiografis Implan	22
4.2.3 Densitas Radiografis Sumsum Tulang	23
4.3 Respons Lokal Berdasarkan Evaluasi Citra Ultrasonografi	24
4.4 Respons Sistemik Berdasarkan Parameter Hematologi	25
4.4.1 Profil Leukosit	29
4.5 Respons Sistemik Berdasarkan Parameter Biokimia Darah	29
5.1 Penyembuhan Luka Secara Makroskopis	36
5.2 Evaluasi Radiografi	37
5.3 Evaluasi Ultrasonografi	38
5.4 Parameter Hematologi	39
5.5 Parameter Biokimia Serum	41
VI SIMPULAN DAN SARAN	43
6.1 Simpulan	43
6.2 Saran	43
DAFTAR PUSTAKA	44
RIWAYAT HIDUP	50

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

1.	Nilai Densitas Radiografi Tulang–Implan dari Waktu ke Waktu pada Berbagai Kelompok Eksperimental	22
2.	Nilai Densitas Radiografi Implan dari Waktu ke Waktu pada Berbagai Kelompok Eksperimental	23
3.	Nilai Densitas Radiografis Sumsum Tulang pada Berbagai Kelompok Perlakuan Selama Periode Pengamatan	23
4.	Nilai Pembengkakan Jaringan Lunak Peri-Implan pada Berbagai Kelompok Perlakuan Selama Periode Pengamatan	24
5.	Summary of Statistical Analysis of Hematological Parameters	25
6.	Nilai Parameter Hematologi Selama Periode Penelitian	28
7.	Parameter Biokimia Serum Selama Periode Penelitian	30
8.	Hasil Analisis Statistik Parameter Biokimia Serum Selama Periode Penelitian	35

DAFTAR GAMBAR

1.	Proses elektrospinning membran PCL/Estradiol	13
2.	Prosedur implantasi bedah.	15
3.	Posisi radiografi	16
4.	Pemantauan lokal pada	17
5.	Respons penyembuhan luka jaringan lunak setelah implantasi.	21
6.	Perubahan densitas radiografis sumsum tulang dari waktu ke waktu pada berbagai kelompok perlakuan	24