

Coating Methods In Guided Bone Regeneration Procedures: A Literature Review

M. Faiz Faz Sukarno*, Helmi Fathurrahman**, Tahta Danifatis Sunnah***

* Mahasiswa S1 Fakultas Kedokteran Gigi Fakultas Kedokteran Gigi UNISSULA

** Departemen Prostodonsia Universitas Islam Sultan Agung

*** Departemen Orthodontia Universitas Islam Sultan Agung

Correspondence: helmi_f@std.unissula.ac.id

Received 5 September 2024; Accepted 30 September 2024; Published online 30 September 2024

Keywords:

Implant; Coating;
Membrane; Edentulous;
Guided Bone
Regeneration

ABSTRACT

Background: The key to the success of implant placement lies in having an adequate alveolar ridge, yet bone loss in the alveolar ridge can occur due to various factors such as periodontal disease, trauma, tumors, and systemic diseases. One technique that can be used to address alveolar bone damage is guided bone regeneration. This study aims to explore and identify coating methods that can be applied to resorbable and non-resorbable membranes in the context of GBR.

Method: The research methodology employed is a literature review. The literature sources were searched through PubMed, Scopus, and the Cochrane Library using the Population, Intervention, Comparison, and Outcome (PICO) method. The review analyzed a total of 30 articles, categorized based on the types of membranes and coating methods used. A narrative literature review approach was utilized in writing the review.

Result: This literature review analyzed 30 articles. Thirteen coating methods were applied to resorbable membranes, and three coating methods to non-resorbable membranes.

Conclusion: Based on the findings of the literature review, the following conclusions can be drawn: (1) Coating methods are applied to overcome the limitations of both resorbable and non-resorbable membranes in the context of GBR. (2) Dip-coating is a commonly used method for both types of membranes in GBR. (3) Dip-coating demonstrates improved mechanical strength and proven enhancement of osteogenic properties, accelerating the bone healing process in GBR. (4) Coating methods can be combined to address the limitations of both resorbable and non-resorbable membranes in GBR procedures.

Copyright ©2022 National Research and Innovation Agency. This is an open access article under the CC BY-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

DOI: <http://dx.doi.org/10.30659/medali.6.2.124-130>

2460-4119 / 2354-5992 ©2024 National Research and Innovation Agency

This is an open access article under the CC BY-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

How to Cite: Sukarno et al. Coating Methods In Guided Bone Regeneration Procedures: A Literature Review. MEDALI Jurnal: Media Dental Intelektual, v.6, n.2, p.124-130, September 2024.

PENDAHULUAN

Beberapa kondisi kronis seperti karies gigi, gangren atau nekrosis akar gigi, dan penyakit periodontal dapat menyebabkan kehilangan gigi asli yang tidak dapat dipertahankan di rongga mulut dan harus diekstraksi¹. Hasil survei riset kesehatan dasar (riskesdas) pada tahun 2018 menyatakan angka prevalensi edentulous nasional pada angka 17,7% dan di Jawa Tengah sebesar 18,6% sedangkan secara global angka prevalensi edentulous lansia diestimasikan sebesar 22%².

Kehilangan gigi-geligi memerlukan gigi tiruan agar dapat memulihkan fungsi mengunyah, fungsi estetika, dan fungsi bicara. Jika gigi-geligi yang hilang tidak diganti dengan gigi tiruan dapat menyebabkan gigi-geligi yang tersisa mengalami kondisi patologis, penurunan tulang alveolar, serta menurunnya fungsi pengunyahan dan bicara. Selain itu, dapat juga terjadi gangguan sendi temporomandibular³.

Pemilihan implan gigi sebagai terapi edentulous saat ini telah mengalami peningkatan pesat karena penggunaan implan yang memiliki sifat osseointegrasi telah merevolusi bidang kedokteran gigi dan meningkatkan tingkat kualitas hidup pasien. Namun, kunci dari kesuksesan pemasangan implan adalah adanya alveolar ridge yang adekuat, namun kehilangan tulang pada alveolar ridge dapat terjadi akibat beberapa faktor seperti adanya penyakit periodontal, trauma, tumor, dan beberapa penyakit sistemik⁴. Perawatan gigi yang baik dan teratur dapat membantu mencegah kehilangan tulang pada alveolar ridge dan memastikan kesuksesan pemasangan implan⁵.

Beberapa teknik dapat digunakan untuk memperbaiki kekurangan dari tulang alveolar seperti teknik grafting onlay dan inlay, free vascularized autografts, distraction osteogenesis, grafting dari sinus maxillaris, ridge splinting, dan guided bone regeneration. Namun, dari berbagai

strategi tersebut, teknik Guided Bone Regeneration (GBR) dianggap lebih efektif dibandingkan dengan teknik lainnya⁶. GBR merupakan suatu prosedur yang dilakukan menggunakan suatu membran yang memungkinkan sel-sel yang diinginkan untuk tumbuh dan mencegah yang tidak diinginkan untuk tumbuh yang bertujuan untuk mengoptimisasi regenerasi tulang⁷.

Membran GBR yang terdiri dari resorbable dan non-resorbable bergantung pada karakteristik degradasinya. Resorbable membrane berasal dari bahan sintesis seperti polyglycolic, polylactic acid dan bahan alami seperti kolagen dan laminar bone. Resorbable membrane memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan non-resorbable membrane⁸. Diantaranya tidak diperlukannya operasi kedua untuk mengangkat membran non-resorbable yang dapat menyebabkan rasa sakit tambahan, ketidaknyamanan, infeksi, dan beban ekonomi⁹. Resorbable membrane menunjukkan kemampuan penyembuhan jaringan yang baik dan dapat dengan cepat terurai jika terdapat luka terbuka karena infeksi bakteri. Membran tersebut dibuat menggunakan bahan polimer alami atau sintetik dan secara efektif terintegrasi dengan jaringan⁷.

Coating adalah teknologi yang telah banyak digunakan dalam berbagai aplikasi di industri medis, mulai dari implantasi tulang hingga produksi obat. Secara umum, coating adalah proses penutupan permukaan suatu bahan dengan lapisan bahan lain yang dapat meningkatkan fungsinya atau memberikan perlindungan terhadap lingkungan¹⁰. Dalam konteks aplikasi coating pada metode GBR, coating digunakan untuk meningkatkan kekuatan dan biokompatibilitas dari membran resorbable dan non-resorbable¹¹.

Coating merupakan teknologi yang dapat membantu mengatasi kekurangan dari membran resorbable dan non-resorbable dalam metode

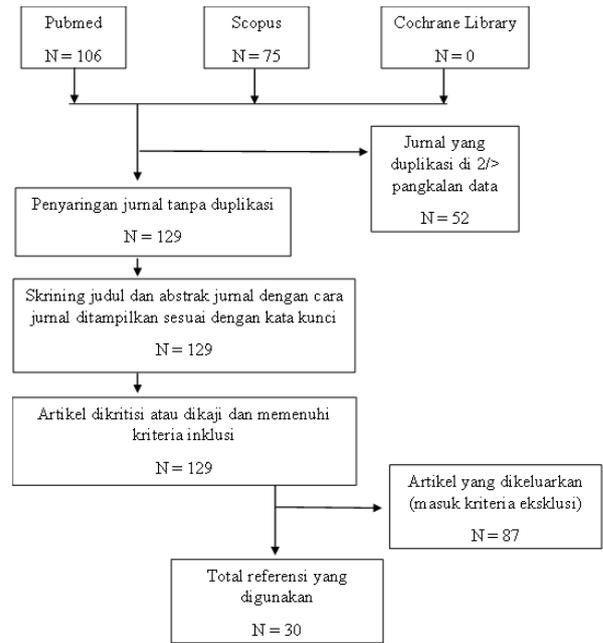
GBR. Coating ini dapat membantu meningkatkan kekuatan mekanis dari membran resorbable, sehingga mengurangi risiko kerusakan pada membran selama operasi atau pada periode penyembuhan awal. Selain itu, coating juga dapat mengontrol kecepatan resorpsi membran, sehingga membran dapat bertahan dalam jangka waktu yang cukup untuk memberikan dukungan yang dibutuhkan pada pertumbuhan tulang¹¹.

Coating pada membran non-resorbable juga dapat membantu mengatasi beberapa kekurangan yang dimilikinya. Dengan menggunakan teknologi coating, membran non-resorbable dapat dibuat lebih halus dan lebih nyaman bagi pasien, sehingga mengurangi risiko infeksi dan iritasi jaringan. Coating juga dapat membantu mengurangi kemungkinan terjadinya kerusakan pada membran selama operasi, sehingga mempercepat proses penyembuhan pasien¹¹.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah *literature review*. Metode *literature review* adalah bentuk penelitian yang dilakukan melalui penelusuran dengan membaca berbagai sumber baik buku jurnal dan terbitan-terbitan lain yang berkaitan dengan topik penelitian, untuk menjawab isu permasalahan yang ada, dengan menggunakan pangkalan data elektronik yang terakreditasi/terindeks sinta seperti Biomed Central, CINAHL, Doaj, Elsevier, Google Scholar, PubMed, Portal Garuda, dan sumber pangkalan data lainnya yang dilengkapi *Digital Object Identifier* (DOI) pada setiap artikel.

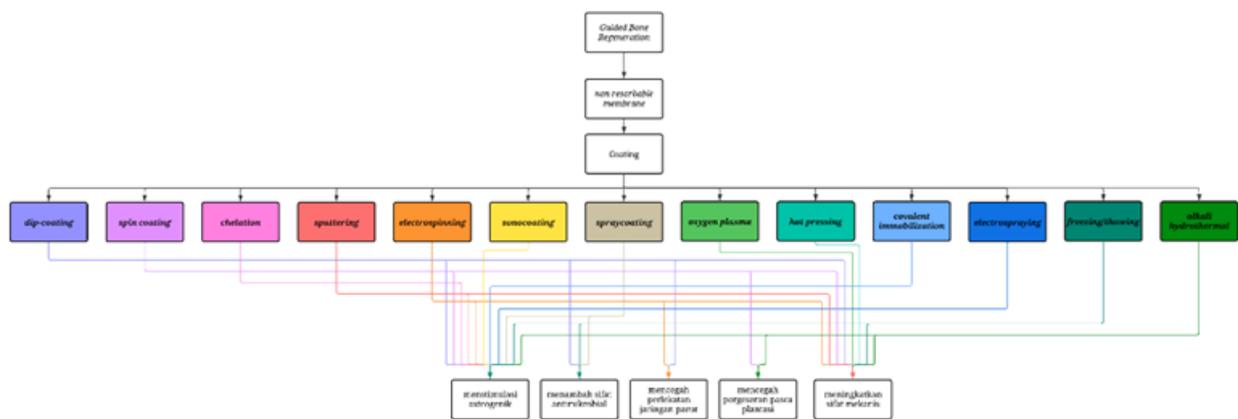
Sumber *literature* yang digunakan dalam penelitian ini ditelusuri melalui PubMed, Scopus, dan Cochrane Library dengan menggunakan metode *Population, Intervention, Comparison, and Outcome* (PICO). Pencarian jurnal menggunakan kata kunci dan *boolean operator* yang digunakan untuk memperluas atau mempersempit pencarian. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian jurnal adalah “*Coating*”, “*Guided Bone Regeneration*”, dan “*Membrane*”. Penelusuran dilakukan sejak April 2023 sampai Juli 2023. Pencarian jurnal pada pangkalan data Scopus menggunakan bantuan aplikasi *Harzing’s Publish or Perish*. Jurnal kemudian diseleksi. Jurnal kemudian diseleksi, metode seleksi dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram Metode *Coating* pada Membran GBR *Resorbable*

HASIL PENELITIAN

Literature review ini menganalisis 30 artikel. Metode penulisan review menggunakan metode *narrative literature review*. Artikel dikategorikan berdasarkan metode jenis membran dan metode *coating* yang digunakan. Terdapat 13 metode *coating* yang diaplikasikan pada membran *resorbable* dan tiga metode *coating* membran *non-resorbable*. Hasil dari penelusuran artikel dapat dilihat di tabel 1 dan tabel 2.



Gambar 2. Diagram Metode *Coating* pada Membran GBR *Resorbable*

DISKUSI

Coating pada membran GBR dapat menggunakan 14 metode yang berbeda. Berikut ini merupakan metode yang dapat digunakan sebagai teknik coating membran GBR.

Dip-coating

Bedasarkan hasil temuan didapatkan bahwa dip-coating merupakan metode coating yang banyak digunakan dalam memodifikasi suatu membran GBR resorbable maupun non-resorbable. Dip-coating memiliki keunggulan yaitu mudah dalam proses pengaplikasian dan tidak memerlukan alat yang khusus. Proses pelapisan dengan teknik celup ini dapat digunakan pada berbagai membran GBR, salah satunya pada membran magnesium alloy dimana membran tersebut memiliki kekurangan pada laju degradasinya yang cepat. Penambahan chitosan sebagai bahan pelapis membran magnesium alloy dapat mengurangi laju degradasi membran tersebut serta menambahkan sifat biokompatibilitas pada membran¹².

Teknik dip-coating dapat diaplikasikan dengan campuran metode lain seperti pada membran Poly(caprolactone) PCL yang telah dimodifikasi dengan teknik electrospinning yang membuat struktur nano-grooved dipermukaannya, selanjutnya dilakukan dip-coating dengan bahan hidroksiapatit. Perlakuan dengan dua teknik ini menghasilkan efek positif pada proses regenerasi tulang, dimana ditemukan meningkatnya tingkat hidrofilik pada permukaan membran dan peningkatan deposisi mineral yang dapat membantu proses regenerasi tulang¹³.

Dip-coating juga dapat digunakan sebagai metode modifikasi membran yang menghasilkan dua karakteristik yang berbeda dalam dua sisi membran. Teknik dip-coating dikombinasikan dengan teknik electrospinning menghasilkan membran Poly(Lactic-Co-Glycolic) acid (PLGA)

dengan dua karakteristik yang berbeda. Salah satu sisi memiliki permukaan yang rata, menggunakan teknik dip-coating, sedangkan sisi yang lain memiliki karakteristik kasar, menggunakan teknik electrospinning. Hasil dari dua karakteristik ini dapat menyesuaikan kebutuhan dalam metode GBR. Sisi halus dapat mencegah perlekatan sel epitel dan mempertahankan struktur membran dengan baik, sedangkan sisi kasar dapat berfungsi sebagai tempat perlekatan sel serta memberikan tingkat kelenturan pada membran tersebut¹⁴.

Sputtering

Teknik sputtering merupakan teknik modifikasi material membran GBR yang sering digunakan. Terdapat dua teknik sputtering yang ditemukan dalam telaah literatur ini, yang pertama adalah teknik direct current (DC) magnetron sputtering. DC magnetron sputtering merupakan teknik deposisi fisik untuk mengendapkan lapisan tipis material pada permukaan suatu substrat. Pada proses DC magnetron sputtering menggunakan arus searah (DC) yang diaplikasikan pada katoda akan menghasilkan medan magnetik di sekitarnya dan menghasilkan proses sputtering¹⁵.

Ketika arus DC diaplikasikan pada katoda (target), elektron bebas di gas sputtering terionisasi oleh medan listrik. Elektron yang diionisasi ini akan diakselerasi oleh medan listrik dan bertabrakan dengan atom dalam lapisan target. Akibatnya, atom-atom dari target terlempar keluar dari permukaannya dan bergerak menuju substrat. Proses ini disebut sputtering¹⁶.

Terdapat dua bahan yang digunakan sebagai pelapis menggunakan metode DC magnetron sputtering dalam temuan telaah literatur ini, yang pertama adalah tantalum. Tantalum diionisasi lalu dilakukan teknik sputtering pada substrat membran Poly(lactic acid) (PLA)¹⁶. Bahan kedua yang dapat digunakan sebagai bahan

pelapisan dengan teknik ini adalah nano hidroksiapatit¹⁵.

Teknik sputtering yang kedua adalah plasma sputtering, proses ini melibatkan penggunaan plasma (gas yang terionisasi) untuk memproyeksikan partikel material dari target padat ke permukaan substrat yang menghasilkan lapisan tipis material yang diinginkan. Dalam proses plasma sputtering, sebuah target yang terbuat dari material yang ingin disimpan, seperti logam atau senyawa keramik, ditempatkan dalam sebuah chamber atau ruang vakum yang diisi dengan gas inert seperti argon. Plasma listrik kemudian dibangkitkan untuk menonaktifkan atom atau ion dari permukaan target. Partikel yang terionisasi dari target akan mengalami akselerasi dan menabrak substrat, membentuk lapisan tipis dengan ketebalan yang sangat terkontrol¹⁵.

Spin Coating

Spin coating merupakan salah satu metode yang digunakan untuk memodifikasi permukaan membran GBR resorbable maupun non-resorbable. Metode spin coating melibatkan penggunaan rotasi untuk mendistribusikan lapisan tipis material cair ke permukaan substrat yang datar. Proses spin coating dimulai dengan menaruh tetes kecil dari larutan polimer cair di tengah permukaan substrat. Setelah itu, substrat diputar dengan kecepatan tinggi. Akibat gaya sentrifugal, larutan polimer akan menyebar keluar dari pusat substrat ke seluruh permukaan substrat, membentuk lapisan tipis yang seragam. Kecepatan rotasi dan konsentrasi larutan polimer dapat diatur untuk mengontrol ketebalan membran yang dihasilkan¹⁷.

Selain teknik spin coating konvensional, teknik ini dapat dimodifikasi menggunakan proses molding. Molding adalah proses pembentukan atau pembuatan objek dengan cara menempatkan atau memasukkan bahan atau material tertentu ke dalam cetakan (mold) yang memiliki bentuk atau

desain tertentu. Teknik ini digunakan sebagai pembentuk nanostuktur pada membran Poly(ϵ -caprolactone) (PCL). Cairan PCL dicetak dengan Polydimethylsiloxane (PDMS) mold kemudian dilakukan spin coating untuk membentuk struktur nanogroove pada permukaan PCL¹³.

Electrospinning

Electrospinning merupakan teknik inovatif dalam pembuatan membran GBR. Proses electrospinning melibatkan penggunaan medan listrik untuk mengubah polimer atau bahan biokompatibel menjadi serat-serat ultrahalus dengan diameter nanometer hingga mikrometer. Pada aplikasi GBR, material yang umum digunakan adalah polimer resorbable, seperti poli(laktat-glikolat) (PLGA) atau poli(kaprolakton) (PCL). Proses electrospinning ini menghasilkan membran GBR dengan struktur pori-pori yang sangat kecil dan luas permukaan yang tinggi, yang memungkinkan untuk regenerasi tulang yang efisien dan kualitas penyembuhan yang lebih baik¹⁴.

Teknik electrospinning ini dapat diaplikasikan sebagai metode pembentukan membran dengan dua karakteristik yang berbeda. Aplikasi electrospinning sebagai metode coating membran PLGA bilayer, dimana teknik ini digunakan untuk membentuk membran dengan karakteristik kasar dan berpori-pori¹⁴.

Sono coating

Sono coating merupakan metode yang inovatif dan efisien untuk mengaplikasikan lapisan atau coating pada membran GBR. Teknik ini melibatkan penggunaan gelombang ultrasonik dengan frekuensi tinggi untuk membantu mendepositkan material coating atau lapisan pada permukaan membran GBR dengan cepat dan secara homogen. Prosesnya dimulai dengan menyediakan larutan atau suspensi material coating yang diinginkan. Kemudian, membran GBR

ditempatkan di dalam larutan tersebut dan gelombang ultrasonik diterapkan. Akibatnya, gaya dan tekanan dari gelombang ultrasonik memaksa material coating untuk menempel erat dan merata di permukaan membran, menciptakan lapisan tipis yang presisi dan kohesif¹⁸.

Spray Coating

Spray coating merupakan salah satu teknik yang dapat digunakan sebagai metode modifikasi permukaan pada membran GBR. Teknik ini melibatkan proses penyemprotan atau pengaplikasian lapisan tipis dari bahan atau material tertentu secara homogen pada permukaan substrat untuk membentuk membran dengan ketebalan yang diinginkan. Proses spray coating biasanya menggunakan alat semprot khusus yang dapat menghasilkan partikel bahan yang sangat halus¹⁹.

Oxygen plasma

Coating dengan plasma oksigen adalah suatu teknik pengendapan lapisan oksida pada permukaan material, yang dilakukan dengan menggunakan teknologi plasma untuk memodifikasi struktur permukaan. Dalam proses ini, material yang akan dicoating ditempatkan dalam lingkungan plasma oksigen, di mana ion dan radikal reaktif terbentuk. Ion-ion ini akan mengenai permukaan material dan menyebabkan etching, yaitu pengurangan atau penghilangan sebagian dari material tersebut, membentuk permukaan yang lebih kasar dan aktif kimia. Setelah etching terjadi, lapisan oksida kemudian akan terbentuk karena adanya reaksi antara material dan oksigen dalam plasma, membentuk ikatan kimia yang kuat antara lapisan oksida dengan substrat material¹⁵.

Hot Pressing

Hot pressing adalah salah satu metode yang digunakan dalam pembuatan membran GBR dengan menggunakan tekanan dan panas untuk membentuk membran dari bahan tertentu. Dalam

proses *hot pressing*, bahan polimer atau material lainnya ditempatkan di antara dua cetakan atau plat dengan bentuk dan ukuran yang diinginkan. Selanjutnya, tekanan dan suhu yang tinggi diterapkan pada bahan tersebut untuk membentuk membran dengan ketebalan dan struktur yang diinginkan²⁰.

Covalent Immobilization

Covalent immobilization adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengikat molekul aktif atau senyawa lain secara kovalen ke permukaan membran. Proses ini melibatkan pembentukan ikatan kovalen antara grup fungsional yang ada pada permukaan membran dengan senyawa atau molekul tertentu yang ingin diikatkan²¹.

Alkali Hydrothermal

Alkali Hydrothermal adalah suatu metode pengolahan atau sintesis material yang melibatkan reaksi kimia antara bahan-bahan tertentu dengan menggunakan larutan alkali dalam kondisi suhu dan tekanan tertentu. Proses ini biasanya dilakukan pada suhu yang tinggi dan menggunakan larutan alkali sebagai medium reaksi²².

Electrospraying

Electrospraying adalah suatu teknik yang digunakan untuk menghasilkan partikel halus atau tetesan cairan dengan ukuran nanometer hingga mikrometer menggunakan medan listrik. Proses *electrospraying* melibatkan ekstrusi atau penyemprotan cairan melalui jarum yang diaplikasikan medan listrik tinggi. Ketika medan listrik diterapkan pada cairan yang keluar dari jarum, gaya elektrostatis menyebabkan cairan tersebut menjadi terdispersi menjadi tetesan-tetesan kecil atau partikel-partikel halus dengan ukuran yang sangat kecil¹⁸.

| No | Referensi | DOI | Metode Penelitian | Latar Belakang | Membran GBR | Jenis Membran GBR | Metode Coating | Bahan Coating | Hasil |
|----|---------------|----------------------------|--|---|--|-------------------|-------------------------|---|--|
| 1 | ²³ | 10.1002/adfm.202214657 | <i>in vivo</i> (mencit) dan <i>in vitro</i> | Seng (Zn) dan paduannya baru-baru ini mendapatkan minat penelitian karena <i>biosafety</i> yang baik, fungsi biologis, biodegradabilitas, dan sifat mampu dibentuk dengan baik. Penggunaan ZnP sebagai material <i>coating</i> diharapkan dapat meningkatkan biokompatibilitas dan ketahanan terhadap korosi pada membran ZCT. | Zn-1Cu-0.1Ti (ZCT) membrane | Resorbable | dip coating | Zinc-phosphate (ZnP) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Mengurangi laju degradasi membran. Peningkatan sifat antibacterial. Peningkatan ketahanan terhadap korosi. Meningkatkan sifat mekanis. <p><i>in vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> ZCT berlapis ZnP menunjukkan efek promosi yang signifikan pada perbaikan cacat tulang. |
| 2 | ²⁴ | 10.2147/IJN.S268182 | <i>in vivo</i> (kelinci) | Mengonfirmasi bahwa perforasi kortikal pada tempat implantasi, dan untuk mengevaluasi apakah <i>block graft nanohydroxyapatite</i> (nHA) yang dilapisi dengan rhVEGF165 serta perforasi kortikal dapat meningkatkan regenerasi tulang secara vertikal. | Nanohydroxyapatite (nHA) Block Grafts | Resorbable | dip coating | recombinant human vascular endothelial growth factor165 (rhVEGF165) | <p><i>in vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Penggunaan blok graft nHA berpori yang dilapisi dengan rhVEGF165 dan perforasi kortikal meningkatkan angiogenesis dan osteodukasi di area tengah, meningkatkan regenerasi tulang secara vertikal dalam model defek kalvaria kelinci, seperti yang ditentukan menggunakan mikro-CT dan mikroskopi fluoresensi histologis. |
| 3 | ²⁵ | 10.1002/jbm.a.36989 | <i>in vivo</i> (mencit) dan <i>in vitro</i> | Membandingkan perubahan vaskularisasi antara membran kolagen <i>perikardium</i> dengan membran kolagen <i>perikardium</i> yang <i>dicoating</i> dengan hydroxyapatit yang ditingkatkan dengan silika | CM3 (Collagen membrane) | Resorbable | spray coating | silicium dioxide-enhanced nanostructure d synthetic hydroxyapatite | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Parameter vaskularisasi nampak meningkat pada hari ketiga Eksresi pembuluh darah yang ditandai dengan CD34 nampak lebih tinggi, menunjukkan adanya kombinasi vaskularisasi yang lebih cepat dan reorganisasi yang lebih cepat. <p><i>in vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Pembentukan vaskularisasi nampak lebih signifikan pada membran kolagen yang <i>dicoating</i> dengan hidroksiapatit. Peningkatan laju vaskularisasi juga tampak signifikan pada membran yang <i>dicoating</i> dibandingkan dengan membran kontrol. |
| 4 | ¹⁴ | 10.1002/pen.25988 | <i>in vitro</i> | Membran GBR harus memiliki pori-pori yang mampu memfasilitasi difusi cairan, oksigen, nutrisi, dan zat-zat bioaktif untuk pertumbuhan sel, tetapi juga harus tidak tembus oleh sel-sel epitel atau fibroblas gingiva, yang dapat membanjiri ruang defek dan menghambat infiltrasi serta aktivitas sel-sel pembentuk tulang. membran PLGA bilayer direalisasikan dengan menggabungkan teknik <i>dip-coating</i> dan <i>elektrospinning</i> | Poly(Lactic-Co-Glycolic) (PLGA) *bilayer | Resorbable | dip coating | PLGA (Smooth layer) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Menggunakan teknik ini permukaan rata dapat dibentuk dan mencegah adanya perlekatan sel epitelial. |
| | | | | | | Resorbable | electrospinning | PLGA (rough layer) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan sifat hidropobik. Meningkatkan sifat mekanis. Memberikan perlekatan sel pada membran dengan adanya struktur yang menyerupai matrix ekstraselular (ECM). |
| 5 | ²¹ | 10.1016/j.pusc.2017.11.102 | <i>in vitro</i> | Cellulose acetate membrane ditingkatkan fungsinya menggunakan <i>resveratrol</i> melalui metode <i>covalent immobilization</i> menggunakan <i>glutaraldehyde</i> sebagai <i>linker</i> . <i>Resveratrol</i> yang merupakan senyawa <i>polifenol</i> yang telah terbukti memiliki efek stimulasi pada pembentukan tulang baik secara <i>in vitro</i> . | Cellulose Acetate Membrane | Resorbable | covalent immobilization | Resveratrol | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan laju regenerasi tulang. Meningkatkan viabilitas osteoblast. Morfologi membran berubah diakibatkan oleh efek <i>cross-link</i>, hal ini mengakibatkan adanya peningkatan deposisi mineral pada membran. |
| 6 | ²⁶ | 10.1016/j.jma.2020.09.013 | <i>in vivo</i> (kelinci) dan <i>in vitro</i> | Mg alloys dapat menjadi alternatif yang menjanjikan sebagai membran untuk prosedur GBR. Namun, kekhawatiran utama tentang perilaku korosi aktif serta pembentukan gas hidrogen secara signifikan meningkatkan kesulitan dalam mendapatkan membran GBR berbasis Mg yang ideal. Oleh karena itu, Mg alloy yang tepat untuk aplikasi GBR masih menjadi pertanyaan terbuka. <i>Coating</i> | Biodegradable Mg-Zn-Gd (MZG) membrane | Resorbable | dip coating | Calcium Phosphate (CaPs) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Laju korosi dari membran MZG dapat dikurangi Meningkatkan regenerasi tulang. Peningkatan efek antibacterial laju resorpsi dapat dikurangi. <p><i>in vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Penerapan membran MZG yang dilapisi CaPs secara tunggal secara signifikan |

CaPs diharapkan dapat mengatasi permasalahan ini.

meningkatkan volume tulang yang diregenerasi dibandingkan dengan kontrol kosong, menunjukkan osteoinduktivitas yang lebih unggul dari membran CaPs MZG yang baru ini.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|------------------------------|---|--|--|-------------------|--------------------------------|---|--|--|-------------------|--------------------|---------------------|--|
| 7 | 20 | 10.1016/j.mbbm.2020.104061 | <i>in vitro</i> | Mempertimbangkan sifat mekanik yang lebih rendah dari polimer bioresorbable saat ini, membran baru <i>magnesium-reinforced</i> PLA yang dapat diserap secara biologis dirancang untuk aplikasi di lokasi defek kritis pada metode GBR | <i>Poly lactide (PLA) membrane</i> | <i>Resorbable</i> | <i>hot pressing</i> | <i>fluoride coated magnesium alloy</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Terdapat peningkatan sifat mekanis yang signifikan dibandingkan dengan membran PLA tanpa <i>coating</i>. • Laju degradasi dapat dikurangi • Terdapat peningkatan PH pada membran dengan <i>coating</i>, namun masih dalam batas aman • Tes viabilitas sel menunjukkan bahwa viabilitas sel tidak terpengaruh oleh penambahan FAZ91 ke PLA | | | | | |
| 8 | 27 | 10.3390/molecules24173067 | <i>in vitro</i> | Membran PCL menunjukkan potensi besar dalam GBR karena memiliki sifat biokompatibel, oklusif dan mempertahankan ruang, tetapi tidak memiliki osteokonduktivitas. Oleh karena itu, dua jenis gelas bioaktif disintesis dan dimasukkan ke dalam membran tipis PCL dengan <i>spin coating</i> untuk meningkatkan efek osteogenik dari membran yang dihasilkan. | <i>Polycaprolactone (PCL)</i> | <i>Resorbable</i> | <i>spin coating</i> | <i>mesoporous bioactive glasses SrBG (SiO2-SrO-P2O5) CaBG (SiO2-CaO-P2O5)</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan sifat mekanis. • Meningkatkan sifat hidrofilik permukaan. • Kultur pada membran PCL-SrBg menunjukkan peningkatan osteogenesis. | | | | | |
| 9 | 28 | 10.1016/j.matdes.2020.109300 | <i>in vivo</i> (mencit) dan <i>in vitro</i> | Bahan bioaktif memiliki keunggulan sifat osteogenik (osteokonduktif dan osteoinduktif) dan diimobilisasi ke membran <i>resorbable</i> untuk menyesuaikan bioaktivitas sel osteogenik untuk GBR. Teknik <i>elektrospinning</i> digunakan untuk membuat struktur tiga dimensi yang mirip dengan ECM diharapkan sebagai situs perlekatan sel regenerasi tulang. | <i>PLGA/PCL (PP) membrane</i> | <i>Resorbable</i> | <i>electrospinning</i> | <i>collagen I</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan pembentukan integrin serta perlekatan, proliferasi dan diferensiasi osteoblast <i>in vivo</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Pencampuran matrix PP dengan kolagen menghasilkan membran PP/Col yang dapat mempromosikan perlekatan dan diferensiasi sel osteogenik. Membran ini dirancang secara khusus sebagai media pendukung ketahanan mekanis serta memberikan situs perlekatan ion kalsium, sehingga kolagen dapat secara sinergis mendukung diferensiasi osteogenik. Kelasi kalsium pada membran PP-pDA diharapkan menghasilkan promosi osteogenik | <i>PLGA/PCL/Collagen (PP/Col) membrane</i> | <i>Resorbable</i> | <i>dip coating</i> | <i>polydopamine</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Sebagai tempat perlekatan ion kalsium • Meningkatkan diferensiasi sel dan osteogenesis <i>in vivo</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Penggunaan <i>polydopamine</i> sebagai <i>coating</i> pada membran PP/Col menghasilkan tempat perlekatan ion kalsium, karena kalsium tidak melekat secara kimiawi terhadap polimer organik |
| | | | | | <i>PLGA/PCL-polyDopamine (PP-pDA) membrane</i> | <i>Resorbable</i> | <i>chelation</i> | <i>calcium ion</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Sitokompatibilitas baik • Membantu adhesi sel • Meningkatkan diferensiasi sel dan osteogenesis dengan integrasi kolagen tipe I <i>in vivo</i> : <ul style="list-style-type: none"> • membran PP-pDA yang dikelasi dengan ion kalsium menghasilkan membran dengan kemampuan adhesi sel yang baik, infiltrasi sel meningkat sebesar 10 kali dibandingkan dengan membran PP tanpa <i>coating</i> | | | | | |
| 10 | 15 | 10.3390/molecules2411050752 | <i>in vitro</i> | Mengkomparasi pertumbuhan dari <i>human osteoblasts</i> pada membran PLGA yang dimodifikasi menggunakan <i>oxygen plasma</i> , nHA, silikon dioksida (SiO ₂), dan nanopartikel komposit titanium dioksida (TiO ₂). | PLGA | <i>Resorbable</i> | <i>Oxygen plasma</i> | <i>oxygen</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Membuat efek etsa, meningkatkan kekasaran permukaan • Sebagai tempat perlekatan oksida pada substrat PLGA | | | | | |
| | | | | | | | <i>DC magnetron Sputtering</i> | nHA | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan biokompatibilitas • Menjaga homeostasis jaringan • Memberikan perlekatan yang baik pada sel | | | | | |
| | | | | | | | <i>plasma sputtering</i> | SiO ₂ | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan biokompatibilitas • Menjaga homeostasis jaringan • Meningkatkan perlekatan sel | | | | | |
| | | | | | | | <i>plasma sputtering</i> | TiO ₂ | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan biokompatibilitas | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|--|---------------|------------------------------------|--|--|---|-------------------|--------------------------------------|---|-------------------|
| 11 | ¹⁸ | 10.3390/na no9111625 | <i>in vitro</i> | Membran GBR masih didominasi dengan penggunaan membran <i>non-resorbable</i> dan membran <i>resorbable</i> yang berasal dari hewan. Kebutuhan meningkat terhadap membran <i>resorbable</i> yang tidak berasal dari hewan. Metode pembuatan membran <i>resorbable</i> yang berasal dari komposit namun memiliki sifat osteogenik dicetuskan. Penambahan nHA diharapkan dapat memberikan sifat osteogenik terhadap membran PDLLA/PLGA | Poly(DL-lactide) (PDLLA)/PLGA | <i>Resorbable</i> | <i>electrospraying</i> | nHA | <i>in vitro</i> : |
| <ul style="list-style-type: none"> • Mengurangi laju degradasi membran • Meningkatkan sifat hidrofilik • Membran dengan <i>coating</i> nHA tidak menimbulkan toksisitas terhadap sel yang dikultur • Pelepasan kalsium lebih cepat terjadi dibandingkan dengan menggunakan metode <i>sonocoating</i> | | | | | | | | | |
| <hr/> | | | | | | | | | |
| <p><i>sono coating</i> nHA <i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan sifat hidrofilik • Meningkatkan biokompatibilitas • Menurunkan laju degradasi membran • Penggunaan <i>sonocoating</i> mengubah sifat permukaan membran yang sebelumnya berserat menjadi membran dengan permukaan rata. | | | | | | | | | |
| 12 | ¹³ | 10.3390/ap p10072398 | <i>in vitro</i> | Terinspirasi oleh matriks ekstraseluler berurutan dan biokeramik dalam jaringan tulang manusia, diselidiki kontribusi relatif dari nanotopografi dan <i>equine bone powders</i> (EBP) dengan human <i>dental pulp stem cells</i> (DPSC) terhadap osteogenesis. Baik nanotopografi maupun EBP secara independen mendorong osteogenesis DPSC, osteogenesis lebih lanjut ditingkatkan oleh kedua faktor tersebut dalam kombinasi, menunjukkan pentingnya faktor desain sinergistik dari membran GBR. | PCL | <i>Resorbable</i> | <i>spin coating (nanotopography)</i> | <i>polydimethylsiloxane (PDMS) mold</i> | <i>in vitro</i> : |
| <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan perlekatan sel • Kultur DPSC pada membran dengan <i>nanotopography</i> menghasilkan sel yang memiliki bentuk yang selaras dengan <i>nanogrooved</i>. | | | | | | | | | |
| <hr/> | | | | | | | | | |
| <p><i>dip coating</i> <i>hydroxyapatite</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan sifat hidrofilik permukaan • Meningkatkan proses osteogenesis • Meningkatkan deposisi mineral | | | | | | | | | |
| 13 | ¹² | 10.1016/j. msec.2019 .03.006 | <i>in vivo</i> (kelinci) dan <i>in vitro</i> | Selain titanium, magnesium (Mg) adalah logam lain yang banyak digunakan dalam bidang biomedis, yang juga menunjukkan sifat biodegradabilitas. Sebuah membran komposit kitosan-magnesium (CS-Mg) dibuat dengan mencelupkan paduan Mg ke dalam larutan kitosan. Tes <i>in vitro</i> dan <i>in vivo</i> dilakukan untuk menyelidiki apakah membran ini dapat digunakan sebagai membran GBR dibandingkan dengan membran GBR komersial. | magnesium Alloy | <i>Resorbable</i> | <i>dip coating</i> | chitosan | <i>in vitro</i> : |
| <ul style="list-style-type: none"> • Mengurangi laju degradasi membran • Meningkatkan biokompatibilitas • Meningkatkan proses regenerasi tulang <i>in vivo</i> : • Membran CS-Mg memiliki laju degradasi yang sama dengan membran GBR komersial. • Kemampuan osteogenik dari membran CS-Mg melampaui membran GBR komersial. • CS-Mg dan membran GBR komersial pada minggu ke 12 dapat terosorpsi secara sempurna dan terbukti mampu memperbaiki defek tulang tanpa diperlukannya <i>bone graft</i>. | | | | | | | | | |
| 14 | ¹⁶ | 10.1016/j. msec.2020 .111112 | <i>in vivo</i> (kelinci) dan <i>in vitro</i> | PLA menarik banyak perhatian untuk digunakan sebagai membran GBR karena memiliki kekuatan mekanik yang relatif tinggi dan biodegradabilitas. Namun, osteokonduktivitas yang kurang baik dari PLA merupakan kekurangan utama. Untuk meningkatkan osteokonduktivitas dari membran regenerasi tulang yang berpandu berbentuk serat dan dihasilkan melalui metode <i>electrospun</i> , digunakan lapisan yang melapisi permukaan serat dengan bahan yang sangat biokompatibel, yaitu tantalum. | PLA | <i>Resorbable</i> | <i>DC magnetron sputtering</i> | Tantalum (Ta) | <i>in vitro</i> : |
| <ul style="list-style-type: none"> • Meningkatkan proses regenerasi tulang • Meningkatkan bioaktivitas <i>in vivo</i> : • Rasio volume tulang yang terbentuk pada membran PLA yang dilapisi dengan Tantalum (Ta-PLA) dua kali lebih tebal dibandingkan dengan membran PLA. • Area defek tulang hampir pulih sempurna pada membran Ta-PLA sedangkan pada membran PLA hanya sedikit area defek yang mengalami perbaikan. • Tulang yang terbentuk pada area defek dengan membran PLA belum terdiferensiasi secara sempurna, sedangkan pada membran Ta-PLA ditemukan banyak sel osteosit. | | | | | | | | | |
| 15 | ¹⁷ | 10.1016/j. mtla.2022. 101517 | <i>in vivo</i> (babi) dan <i>ex vivo</i> | Membran barrier umumnya difiksasi untuk mencegah pergeseran atau lepasnya membran. Namun, bahan perekat yang umumnya digunakan kebanyakan bersifat tidak terdegradasi dan perlu dihilangkan setelah penyembuhan jaringan. Membran penghalang baru dengan lapisan polimer yang menempel pada tulang dikembangkan untuk mengatasi kekurangan-kekurangan ini. | PLGA | <i>Resorbable</i> | <i>spin coating</i> | bone adhesive polymers | <i>in vitro</i> : |
| <ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan kinerja awal yang baik dari membran penghalang yang dilapisi POx-OH-NHS (<i>bone adhesive polymer</i>) dalam hal karakteristik penempelan dan kohesi tulang, namun tidak memberikan penambahan sifat perekatan lebih lanjut terhadap jaringan tulang. <p><i>ex vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menunjukkan hasil yang relatif sama dengan pengujian secara <i>in vivo</i> | | | | | | | | | |
| 16 | ²⁹ | 10.1089/te n.tea.2020. 0015 | <i>in vivo</i> (mencit) dan <i>in vitro</i> | Meskipun banyak metode yang berhasil meningkatkan regenerasi tulang menggunakan membran GBR, tetapi sering kali dilaporkan reaksi inflamasi serius pada antarmuka jaringan selama proses bedah, dan akibatnya, regenerasi tulang menjadi berkurang. dikembangkan sebuah membran yang diimmobilisasi dengan laktoferrin untuk mengatur regenerasi tulang dan respons inflamasi. Laktoferrin diimmobilisasi pada nanofiber hasil <i>elektrospinning</i> PLLA/PCL dengan memanfaatkan metode pelapisan polidopamin yang | poly(L-lactic acid) (PLLA) / PCL membrane | <i>Resorbable</i> | <i>dip coating</i> | Lactoferrin (dimediasi polydopamine) | <i>in vitro</i> : |
| <ul style="list-style-type: none"> • Mengurangi efek inflamasi • Jumlah laktoferrin yang diimmobilisasi pada membran dapat dimodulasi dengan penggunaan <i>polydopamine</i> • Studi <i>in vitro</i> dengan hADSCs menunjukkan bahwa nanofiber yang difungsikan dengan laktoferrin meningkatkan proliferasi dan diferensiasi osteogenik sel-sel. <p><i>in vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Membran nanofiber yang difungsikan dengan laktoferrin menghasilkan peningkatan osteogenesis yang signifikan dan dapat menghambat | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|----|---------------|---------------------------------|--|--|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|--|--|
| | | | | bersifat perekat. Ketika sel punca yang berasal dari lemak manusia (hADSCs) ditanamkan pada nanofiber tersebut, LF50 (<i>Lactoferrin functionalized PLLA/PCL membrane</i>) secara signifikan meningkatkan diferensiasi osteogenik. | | | | | pembentukan jaringan inflamasi pasca plantasi. |
| 17 | ¹⁹ | 10.1371/journal.pone.0251864 | <i>in vivo</i> (kelinci) dan <i>in vitro</i> | Testosteron dan alendronat telah diidentifikasi sebagai dua senyawa penyembuh tulang, yang saat digabungkan secara sinergis merangsang regenerasi tulang. Pengembangan lapisan semprot ultrasonik yang baru untuk pelepasan berkelanjutan dari jumlah kecil testosteron dan alendronat yang dienkapsulasi dalam PLGA sebagai penghantar pada membran kolagen perikardial. | <i>pericardial collagen membrane</i> | <i>Resorbable</i> | <i>spray coating</i> | Testosterone dan alendronate (dimediasi PLGA) | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan osseointegrasi implan Meningkatkan proses regenerasi tulang Penggunaan PLGA sebagai lapisan atas dapat mempertahankan pelepasan testosteron dan alendronat secara bertahap <i>in vivo</i> : <ul style="list-style-type: none"> Penggunaan testosteron dan alendronat yang dienkapsulasi dengan PLGA berhasil mencegah pelepasan secara serentak serta mempertahankan pelepasan yang bertahap selama 3-4 minggu. Data <i>in vivo</i> mengkonfirmasi pelepasan testosteron dan alendronat menghasilkan efek yang signifikan terhadap pembentukan tulang yang diukur melalui histologi and μCT. |
| 18 | ³⁰ | 10.5037/journal.pone.2020.11304 | <i>in vivo</i> (babi) dan <i>in vitro</i> | Evaluasi mengenai penggunaan <i>coating</i> testosteron dan alendronat pada membran kolagen yang dienkapsulasi dengan PLGA dibandingkan dengan membran tanpa <i>coating</i> | <i>Collagen Membrane</i> | <i>Resorbable</i> | <i>spray coating</i> | Testosterone dan alendronate (dimediasi PLGA) | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan formasi pembentukan tulang. Pelepasan testosteron dan alendronate dapat dikontrol dengan pelapisan PLGA. <i>in vivo</i> : <ul style="list-style-type: none"> Ditemukan pelepasan testosteron secara bertahap. Tidak ditemukan adanya reaksi inflamasi pada situs implantasi. Hasil analisis histologi mengkonfirmasi pembentukan tulang lebih mature pada membran yang dilapisi dengan <i>testosterone</i> dan <i>alendronate</i>. |
| 19 | ³¹ | 10.3389/fp-har.2020.0431 | <i>in vitro</i> | Infeksi bakteri merupakan masalah kritis dalam infeksi implan. Membran PLLA memiliki potensi besar untuk GBR, namun PLLA tidak memiliki sifat antibakteri dan karena itu dapat menghadapi resiko infeksi bakteri. | PLLA | <i>Resorbable</i> | <i>dip coating</i> | <i>Silver Nanoparticles</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan sifat anti-bakterial. Mengurangi toksisitas. Pengujian <i>in vivo</i> diperlukan untuk mengkonfirmasi dari hasil uji toksisitas <i>in vitro</i>. |
| 20 | ³² | 10.4317/materials.23171 | <i>in vivo</i> (kelinci) | Meneliti tentang efek dari pendambahan partikel nano perak kepada membran PLA yang diharapkan dapat menambahkan sifat antibakteri pada membran PLA | PLA membrane | <i>Resorbable</i> | <i>dip coating</i> | <i>colloid solution-derived silver nanoparticles coating</i> | <i>in vivo</i> : <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan sifat anti-mikrobal dan anti-inflamasi Proporsi sel CD3+ dan CD30+ yang lebih rendah dalam kelompok eksperimental menunjukkan penurunan aktivitas respons inflamasi terhadap benda asing, terutama oleh limfosit yang teraktivasi. Hasil yang diperoleh mengindikasikan adanya aktivitas antimikroba yang cukup dari lapisan membran PLA yang dilapisi dengan nanopartikel perak yang berasal dari larutan koloid. |
| 21 | ²² | 10.3389/fbioe.2021.652334 | <i>in vivo</i> (tikus) dan <i>in vitro</i> | Membran Mg adalah bahan yang menjanjikan dalam bidang biomedis berkat biokompatibilitasnya, kemampuan penyerapan, dan karakteristik biomekanik yang sangat baik. Namun, degradasi cepat Mg di lingkungan fisiologis menimbulkan masalah perubahan pH di sekitar implan dan pelepasan gas, yang tidak hanya mengurangi kekuatan mekanik tetapi juga meningkatkan beban metabolik pada organ, sehingga membatasi aplikabilitasnya. CaPs dilapisi pada permukaan Mg murni melalui perlakuan alkali-hidrotermal sederhana. | <i>Magnesium Mesh</i> | <i>Resorbable</i> | <i>alkali-hydrothermal</i> | CaPs | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan energi permukaan Meningkatkan sifat hidrofilik Meningkatkan afinitas sel Mengurangi laju degradasi membran <i>in vivo</i> : <ul style="list-style-type: none"> Lapisan CaPs memiliki afinitas tinggi terhadap osteoblas, yang menghasilkan osteointegrasi di antarmuka implan dengan jaringan inang. Mg mesh yang dilapisi dengan CaPs menghasilkan ketahanan terhadap terjadinya korosi, dan mencegah pembentukan gas yang dapat menghambat pembentukan tulang baru Hasil analisis histologi menunjukkan lebih banyak jaringan tulang baru yang <i>mature</i> pada membran dengan pelapisan CaPs |
| 22 | ³³ | 10.3389/fbioe.2021.630977 | <i>in vitro</i> | GBR adalah pengobatan yang menjanjikan untuk kecacatan jaringan periodontal. Namun, membran yang ada memiliki sifat mekanik yang tidak mencukupi dan keterbatasan bioaktivitas untuk regenerasi tulang periodontal. Dalam hal ini, dibuatlah membran dua lapisan dari kolagen ikan dan polivinil alkohol (Col/PVA) melalui metode gabungan pembekuan/pencairan dan lapisan. Membran dua lapisan ini memiliki garis batas kontak yang jelas antara lapisan kolagen dan PVA, keduanya bersifat hidrofilik. | <i>fish collagen</i> | <i>Resorbable</i> | <i>freezing/thawing</i> | <i>polyvinyl alcohol (PVA)</i> | <i>in vitro</i> : <ul style="list-style-type: none"> Merupakan barrier yang stabil dan memiliki laju degradasi yang baik Memiliki cytocompatibility yang baik Meningkatkan regenerasi tulang |

| | | | | | | | | | |
|----|---------------|------------------------------|---|---|--------------------|------------|-------------------------|-----------------------------|--|
| 23 | ³⁴ | 10.3390/biomedicines/8120636 | <i>in vivo</i> (mencit) dan <i>in vitro</i> | Hingga saat ini, belum ada alternatif membran <i>resorbable</i> yang dapat menggantikan membran <i>non-resorbable</i> yang memiliki stabilitas volume yang baik sebagai membran GBR. Bahkan Mg telah terbukti menjadi bahan biomaterial yang menguntungkan untuk pengembangan struktur penstabil. Namun, telah dijelaskan bahwa perlu mencegah degradasi prematur untuk memastikan baik fungsionalitas maupun biokompatibilitas dari implan Mg tersebut. teknik sputtering menggunakan CrN diharapkan dapat mengatasi degradasi prematur dari Mg. | Magnesium membrane | Resorbable | DC magnetron sputtering | Chromium nitride (CrN) | <i>in vitro</i> : <i>in vivo</i> : |
| | | | | | | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Tidak cytocompatible, membran magnesium murni dapat memenuhi persyaratan biokompatibilitas • Ditemukan cytocompatibilitas yang buruk, respon inflamasi yang lebih tinggi, serta akumulasi makrofag di permukaan bahan mengindikasikan bahwa reaksi ini timbul akibat efek <i>coating</i>. |
| 24 | ³⁵ | 10.3390/ce/11s11091582 | <i>in vitro</i> | Kekurangan dari penggunaan membran GBR yang ada di pasaran adalah kurangnya sifat osteogenik dan antibakterial. Tujuan dari pembuatan membran dengan teknik elektrospinning dipadukan dengan <i>sonocoating</i> asalah mencampurkan karakteristik HA yang memiliki sifat osteogenik dan silver yang memiliki sifat antibakterial. | PDLLA/PLGA | Resorbable | <i>sono coating</i> | HA dan ZnO:Ag Nanoparticles | <i>in vitro</i> : |
| | | | | | | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Mengurangi sifat sitotoksik • Meningkatkan sifat anti-bakterial • Terjadinya peningkatan osteogenik |

Tabel 1. Hasil Pencarian *Literature* pada Membran GBR *Resorbable*

| No | Referensi | DOI | Metode Penelitian | Latar Belakang | Membran GBR | Jenis Membran GBR | Metode Coating | Bahan Coating | Hasil |
|----|---------------|--------------------------|---------------------------------------|---|--|-------------------|---------------------|---|---|
| 1 | ³⁶ | 10.1002/btm2.10493 | <i>in vivo (mencit) dan in vitro</i> | Mengatasi permasalahan jaringan yang menginfeksi pori-pori membran Titanium (Ti) <i>mesh</i> , yang berakibat pada turunnya bioaktivitas. Penggunaan <i>muschel adhesive protein</i> (MAP) <i>coating</i> diharapkan dapat mempercepat proses regenerasi tulang dan memberikan kinerja yang baik sebagai membran barrier. | Ti mesh | Non-Resorbable | <i>dip coating</i> | muschel adhesive protein (MAP) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan perilaku osteogenik sell Mempercepat laju regenerasi tulang Mencegah adanya invasi dari sell fibroblast. <p><i>in vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Tulang baru yang terbentuk pada membran dengan perlakuan <i>coating</i> lebih tebal dibandingkan dengan membran tanpa perlakuan Struktur tulang yang terbentuk pada membran dengan perlakuan <i>coating</i> lebih mature dibandingkan dengan membran yang tanpa perlakuan |
| 2 | ³⁷ | 10.1021/ac-sabm.9b00972 | <i>in vitro</i> | Memberikan ketahanan membran <i>polytetrafluoroethylene</i> (PTFE) terhadap pergeseran pasca plantasi. membuat situs perlekatan sell agar membran dapat terintegrasi dengan baik terhadap jaringan plantasi. | PTFE | Non-Resorbable | <i>spin coating</i> | <i>recombinant functionalized spider silk protein</i> (FN-silk) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan bioaktivitas Membuat struktur seperti ECM, sebagai tempat perlekatan sell Dalam kurun waktu 7 hari, kultur sell menunjukkan peningkatan yang signifikan terhadap jumlah, kepadatan, membentuk perlekatan pada kontak antara substrat dan sell. |
| 3 | ³⁸ | 10.2147/IJN.S269169 | <i>in vitro</i> | Membuka bidang studi baru mengenai aplikasi MOFs (<i>Metal-Organic Frameworks</i>) dalam pembuatan membran yang mampu meniru berbagai sifat mekanokimia dari jaringan alami. | <i>Polypropylene</i> | Non-Resorbable | <i>dip coating</i> | <i>zeolitic imidazolate framework-8</i> (ZIF-8) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan energi permukaan Meningkatkan sifat hidrofilik Meningkatkan kekasaran permukaan Meningkatkan sifat mekanis Mempercepat laju regenerasi tulang |
| 4 | ³⁹ | 10.3390/coatings12121947 | <i>in vitro</i> | Memberikan metode untuk menyiapkan membran Janus berlapis P(VDF-TrFE)-PMMA yang memiliki karakteristik anti-adhesi sel ephitel dan fibroblast dan karakteristik yang mendorong adhesi jaringan tulang. | <i>Poly methyl methacrylate</i> (PMMA) | Non-Resorbable | <i>spin coating</i> | <i>Poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene)</i> P(VDF-TrFE) | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Mempercepat proses penyembuhan tulang Sisi PMMA dapat mencegah pertumbuhan sel NIH3T3 (sel fibroblas embrio mencit) |
| 5 | ⁴⁰ | 10.3390/nano12030569 | <i>in vivo (kelinci) dan in vitro</i> | Untuk meningkatkan kapasitas muatan leptospermon pada membran Ti mesh dan memberikan biofungsionalitas, lapisan nanotubular TiO ₂ dianodisasikan pada permukaan membran Ti mesh. | Ti mesh | Non-Resorbable | Anodized | oxygen | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan sifat hidrofilik Meningkatkan bioaktivitas Meningkatkan laju regenerasi tulang <p><i>in vivo</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Membran titanium dengan teknik anodized menghasilkan rangsangan pembentukan tulang yang lebih cepat pada membran, pembentukan tulang secara aktif dan padat terbentuk didalam situs kerusakan tulang dengan secara serempak dalam pembentukan tulang diatas jaringan. |
| | | | | Minyak manuka yang digunakan menunjukkan efek penghambatan yang kuat terhadap beberapa bakteri patogen, termasuk bakteri mulut yang representatif, bahkan pada konsentrasi minyak yang sangat rendah, sehingga diharapkan dapat | | | <i>dip coating</i> | manuka oil | <p><i>in vitro</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> Meningkatkan sifat anti-bakterial Memiliki biokompatibilitas yang sangat baik Mencegah terjadinya stenosis dari jaringan ikat disekitar membran |

Chelation

Chelation adalah proses pembentukan ikatan kuat antara suatu senyawa kimia dengan ion logam melalui pembentukan cincin atau rantai melingkar. Senyawa yang terlibat dalam proses *chelation* disebut agen kompleks atau *chelator*. Proses *coating* dengan metode *chelation* dapat dilakukan dengan pelapisan membran dengan *polydopamine* terlebih dahulu. Pada *chelation* membran PLGA/PCL dengan ion kalsium, *polydopamine* digunakan sebagai *chelator* untuk mengikat atau menggandeng ion kalsium (Ca^{2+}) dari larutan²⁸.

Freezing/Thawing

Freezing/Thawing coating adalah salah satu metode yang digunakan dalam pembuatan membran GBR untuk meningkatkan sifat permeabilitas membran. Proses ini melibatkan penerapan teknik pembekuan dan pencairan secara berulang-ulang³³.

Anodized

Teknik *anodized* adalah salah satu metode yang digunakan untuk memodifikasi membran *non-resorbable* yang digunakan dalam GBR. Proses *anodized* membentuk lapisan oksida pada permukaan membran *non-resorbable* yang umumnya terbuat dari bahan seperti titanium. Proses ini melibatkan anodisasi, yaitu proses elektrokimia di mana bahan membran ditempatkan sebagai katoda dalam elektrolit dan dikenai arus listrik sehingga terjadi pembentukan lapisan oksida pada permukaan membran⁴⁰.

Coating Membran Resorbable

Membran *resorbable* memiliki kelebihan dibandingkan membran *non-resorbable*, dimana tidak diperlukan adanya tindakan kedua pasca penyembuhan tulang menggunakan teknik GBR berhasil dilakukan. Namun selain kelebihan tersebut, membran GBR *resorbable* memiliki

beberapa tantangan tersendiri yang masih perlu dipecahkan.

Membran berbasis logam seperti Zinc (Zn) dan Magnesium (Mg) merupakan pilihan yang menjanjikan untuk digunakan sebagai membran GBR *resorbable*, namun terdapat permasalahan dimana penggunaan membran ini dapat terjadi reaksi korosi yang dapat menghambat proses penyembuhan tulang. Selain itu korosi juga menyebabkan fungsi *barrier* membran tersebut terganggu.

Permasalahan lain juga timbul pada membran GBR *resorbable* yang berbasis komposit, seperti *Poly(Lactic-Co-Glycolic Acid)* (PLGA), *Poly(Lactide Acid)* (PLA), *Poly(ε-caprolactone)* (PCL), dan *Poly(L-Lactic Acid)* (PLLA) memiliki kekurangan pada kurangnya sifat osteogenik dan antimikrobal yang dapat menyebabkan reaksi inflamasi selama proses pembedahan.

Peningkatan sifat osteogenik dapat dilakukan melalui berbagai metode *coating*. Salah satu yang paling sering digunakan untuk menambahkan fungsionalitas dari membran GBR *resorbable* yang berbasis polimer adalah metode *dip-coating*.

Hasil pengujian secara *in vivo* pada metode *dip-coating* pada membran GBR berbasis Mg menggunakan *Calcium Phosphates* (CaPs) menghasilkan membran yang lebih tahan korosi dan memperpanjang waktu degradasinya. Selain itu Pelapisan CaPs juga menghasilkan tingkat osteoinduktivitas yang lebih baik³⁶.

Pengujian secara *in vivo* juga telah dilakukan pada membran PLGA/PCL yang dicampur dengan kolagen tipe I melalui proses *electrospinning*. Ditemukan adanya promosi perlekatan dan diferensiasi sel osteogenik pada membran yang telah dilakukan pencampuran dengan kolagen. Penambahan sifat pada membran GBR ini tidak hanya dapat berhenti disini, tapi juga dapat

dikombinasikan dengan metode *dip-coating* dengan bahan *polydopamine* yang menghasilkan situs perlekatan ion kalsium. Selanjutnya dapat ditambahkan ion kalsium melalui metode kelasi, yang menghasilkan suatu membran PLGA/PCL yang memiliki kemampuan adhesi sel osteogenik yang baik, serta meningkatkan infiltrasi sel sebesar 10 kali jika dibandingkan dengan membran PLGA/PCL yang tidak dilakukan *coating*²⁸.

Kurangnya sifat anti-inflamasi dan anti-mikrobia dapat ditangani dengan menggunakan metode *dip-coating*, penambahan laktoferin pada permukaan PLLA melalui proses *dip-coating* yang dimediasi melalui *polydopamine* terbukti mampu menghambat adanya reaksi inflamasi pasca plantasi membran dan juga terjadi peningkatan laju osteogenesis²⁹.

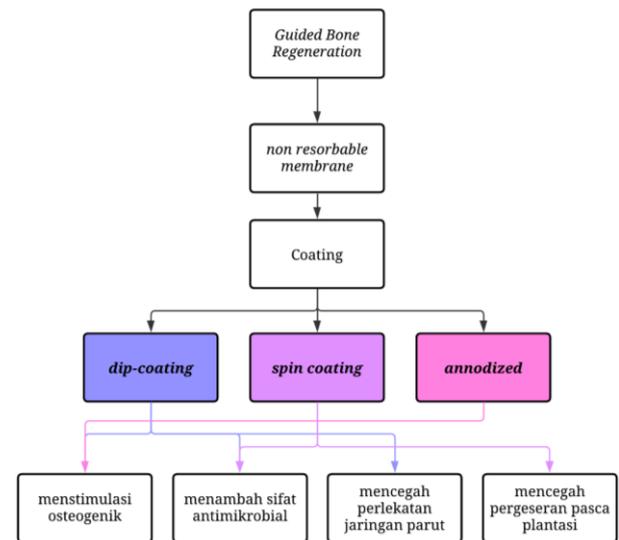
Tidak hanya dapat menggunakan satu metode *coating* untuk mengatasi tantangan dari penggunaan membran resorbable dalam GBR, tetapi menggunakan beragam teknik *coating* yang dikombinasikan dalam meningkatkan sifat membran dapat menjadi solusi dari tantangan penggunaan membran resorbable dalam konteks GBR.

Coating Membran Non-Resorbable

Coating pada membran GBR non-resorbable ditujukan untuk mengatasi kekurangan dari membran non-resorbable dimana membran ini tidak memiliki sifat osteogenik yang baik³⁶. Selain itu permasalahan lain yang muncul dari sifat asli membran yang tidak mudah untuk ditempel bahan lain, meskipun hal ini dapat menjadi hal positif dimana membran dapat mencegah adanya perlekatan jaringan parut pada membran, tetapi ini juga dapat menyebabkan membran mudah bergeser pasca implantasi yang menyebabkan fungsi barrier dari membran tersebut berkurang³⁷.

Analisis *in vivo* mengenai penggunaan material Titanium (Ti) mesh yang telah dilakukan

menemukan suatu kekurangan dari penggunaan membran ini. Salah satu hal yang perlu diperhatikan adalah resiko dari terbentuknya jaringan parut pada pori-pori membran yang berakibat pada turunnya bioaktivitas³⁶. Selain itu kurangnya sifat antibakterial dan osteogenik merupakan tantangan dari penggunaan membran ini dalam metode GBR⁴⁰.



Gambar 2. Diagram Metode *Coating* pada Membran GBR Non-Resorbable

Metode *dip-coating* terbukti mampu untuk meningkatkan bioaktivitas dari membran GBR *non-resorbable*, serta dapat mengatasi permasalahan infasi jaringan parut pada pori-pori membran Ti *mesh*. Penambahan minyak manuka melalui metode *dip-coating* terbukti dapat menghasilkan densitas tulang yang lebih tinggi³⁶.

Teknik anodisasi dapat membentuk struktur nano pori yang memungkinkan terjadinya deposisi mineral dan membantu meningkatkan kapasitas leptospermone yang berasal dari minyak manuka. Hal ini secara sinergis menghasilkan membran Ti *mesh* yang memiliki sifat osteogenik yang ditingkatkan untuk membantu perbaikan tulang dalam GBR⁴⁰.

Membran yang berasal dari polimer seperti PTFE, *polypropylene* dan Poly(methyl-methacrylate acid) (PMMA) memiliki kekurangan dalam sifat osteogenik. Pengaplikasian *dip-coating* dan *spin coating* terbukti mampu untuk memberikan sifat osteogenik pada membran ini, sehingga proses penyembuhan tulang dalam metode GBR dapat dipercepat.

KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil literature review ini mengindikasikan bahwa aplikasi metode coating memiliki tujuan utama untuk mengatasi kelemahan yang ada pada membran resorbable dan non-resorbable dalam konteks GBR (Guided Bone Regeneration). Metode dip-coating menjadi pilihan utama dalam proses ini, baik untuk membran GBR yang bersifat resorbable maupun non-resorbable. Penggunaan metode dip-coating ini memiliki efek positif terhadap peningkatan kekuatan mekanis membran dan telah terbukti mampu meningkatkan sifat osteogenik, yang pada gilirannya dapat mempercepat proses penyembuhan tulang dalam prosedur GBR. Oleh karena itu, metode coating menjadi solusi yang menjanjikan untuk mengatasi kendala-kendala yang terkait dengan membran resorbable dan non-resorbable dalam bidang GBR, dengan kemungkinan untuk menggabungkan berbagai metode coating guna memaksimalkan hasil dan memperbaiki kelemahan yang ada pada kedua jenis membran tersebut.

Dalam rangka meningkatkan efektivitas prosedur GBR, hasil literature review menunjukkan bahwa penerapan metode coating memiliki potensi besar. Metode dip-coating, khususnya, telah terbukti memberikan sejumlah manfaat signifikan pada membran GBR, baik yang resorbable maupun non-resorbable. Peningkatan dalam hal kekuatan mekanis dan sifat osteogenik membran

memberikan dampak positif terhadap penyembuhan tulang dan kesuksesan prosedur GBR secara keseluruhan. Dalam konteks ini, penggabungan berbagai metode coating juga menjadi alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi kekurangan-kekurangan yang mungkin ada pada kedua jenis membran. Dengan demikian, penelitian lebih lanjut dan eksperimen lebih lanjut tentang kombinasi metode coating ini berpotensi memberikan kontribusi yang berharga dalam pengembangan teknik GBR yang lebih baik di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Lee DJ, Saponaro PC. Management of Edentulous Patients. *Dent Clin North Am* [Internet]. 2019;63(2):249–61. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.cden.2018.11.006>
2. Borg-Bartolo R, Rocuzzo A, Molinero-Mourelle P, Schimmel M, Gambetta-Tessini K, Chaurasia A, et al. Global prevalence of edentulism and dental caries in middle-aged and elderly persons: A systematic review and meta-analysis. *J Dent* [Internet]. 2022;127:104335. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300571222003906>
3. Emami E, de Souza RF, Kabawat M, Feine JS. The impact of edentulism on oral and general health. *Int J Dent*. 2013;2013:498305.
4. Elgali I, Omar O, Dahlin C, Thomsen P. Guided bone regeneration: materials and biological mechanisms revisited. *Eur J Oral Sci*. 2017 Oct 1;125(5):315–37.
5. Cheung MC, Hopcraft MS, Darby IB. Patient-reported oral hygiene and implant outcomes in general dental practice. *Aust Dent J* [Internet]. 2021 Mar 1;66(1):49–60. Available from: <https://doi.org/10.1111/adj.12806>
6. Aprile P, Letourneur D, Simon-Yarza T. Membranes for Guided Bone Regeneration: A Road from Bench to Bedside. *Adv Healthc Mater*. 2020;9(19).
7. Rakhmatia YD, Ayukawa Y, Furuhashi A, Koyano K, Rakhmatia YD, Ayukawa Y, et al. Selection of Commercially Available Membrane between Resorbable and Nonresorbable Materials for Guided Bone Regeneration. *J Dent Indones* [Internet]. 2022;29(2):8–31. Available from:

- <https://scholarhub.ui.ac.id/jdi>
8. Wang B, Feng C, Liu Y, Mi F, Dong J. Recent advances in biofunctional guided bone regeneration materials for repairing defective alveolar and maxillofacial bone: A review. *Jpn Dent Sci Rev* [Internet]. 2022;58:233–48. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2022.07.002>
 9. Park JY, Jung IH, Kim YK, Lim HC, Lee JS, Jung UW, et al. Guided bone regeneration using 1-ethyl-3-(3-dimethylaminopropyl) carbodiimide (EDC)-cross-linked type-I collagen membrane with biphasic calcium phosphate at rabbit calvarial defects. *Biomater Res* [Internet]. 2015;19(1):1–10. Available from: <http://dx.doi.org/10.1186/s40824-015-0038-y>
 10. Nathanael AJ, Oh TH. Biopolymer coatings for biomedical applications. *Polymers (Basel)*. 2020;12(12):1–26.
 11. Jeong J, Kim JH, Shim JH, Hwang NS, Heo CY. Bioactive calcium phosphate materials and applications in bone regeneration. *Biomater Res*. 2019;23:4.
 12. Guo Y, Yu Y, Han L, Ma S, Zhao J, Chen H, et al. Biocompatibility and osteogenic activity of guided bone regeneration membrane based on chitosan-coated magnesium alloy. *Mater Sci Eng C* [Internet]. 2019;100:226–35. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493118300687>
 13. Jang KJ, Kim S, Park S, Kim W, Gwon Y, Park S, et al. Lithographically-Fabricated HA-Incorporated PCL Nanopatterned Patch for Tissue Engineering. Vol. 10, *Applied Sciences*. 2020.
 14. Nitti P, Palazzo B, Gallo N, Scalera F, Sannino A, Gervaso F. Smooth-rough asymmetric PLGA structure made of dip coating membrane and electrospun nanofibrous scaffolds meant to be used for guided tissue regeneration of periodontium. *Polym Eng Sci* [Internet]. 2022 Jun 1;62(6):2061–9. Available from: <https://doi.org/10.1002/pen.25988>
 15. Torres-Lagares D, Castellanos-Cosano L, Serrera-Figallo MA, López-Santos C, Barranco A, Rodríguez-González-Elipe A, et al. In Vitro Comparative Study of Oxygen Plasma Treated Poly(Lactic–Co–Glycolic) (PLGA) Membranes and Supported Nanostructured Oxides for Guided Bone Regeneration Processes. Vol. 11, *Materials*. 2018.
 16. Hwang C, Park S, Kang IG, Kim HE, Han CM. Tantalum-coated polylactic acid fibrous membranes for guided bone regeneration. *Mater Sci Eng C* [Internet]. 2020;115:111112. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493120311115>
 17. van Erk M, Lomme R, Sánchez-Fernández MJ, van Oirschot BAJA, Félix Lanao RP, Leeuwenburgh SCG, et al. Novel alendronate and NHS-ester functionalized poly(2-oxazoline)s bone adhesive barrier membranes for guided bone regeneration: Prototype selection and experimental model comparison. *Materialia* [Internet]. 2022;24:101517. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589152922001995>
 18. Higuchi J, Fortunato G, Woźniak B, Chodara A, Domaschke S, Męczyńska-Wielgosz S, et al. Polymer Membranes Sono-coated and Electrospayed with Nano-Hydroxyapatite for Periodontal Tissues Regeneration. Vol. 9, *Nanomaterials*. 2019.
 19. van de Ven CJJM, Bakker NEC, Link DP, Geven EJW, Gossen JA. Sustained release of ancillary amounts of testosterone and alendronate from PLGA coated pericard membranes and implants to improve bone healing. *PLoS One* [Internet]. 2021 May 17;16(5):e0251864. Available from: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0251864>
 20. Zhang HY, Jiang HB, Kim JE, Zhang S, Kim KM, Kwon JS. Bioresorbable magnesium-reinforced PLA membrane for guided bone/tissue regeneration. *J Mech Behav Biomed Mater* [Internet]. 2020;112:104061. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175161612030610X>
 21. Pandeale AM, Neacsu P, Cimpean A, Staras AI, Miculescu F, Iordache A, et al. Cellulose acetate membranes functionalized with resveratrol by covalent immobilization for improved osseointegration. *Appl Surf Sci* [Internet]. 2018;438:2–13. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433217333743>
 22. Wu S, Jang YS, Lee MH. Enhancement of Bone Regeneration on Calcium-Phosphate-Coated Magnesium Mesh: Using the Rat Calvarial Model [Internet]. Vol. 9, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.652334>
 23. Tong X, Han Y, Zhu L, Zhou R, Lin Z, Wang H, et al. ZnP-Coated Zn□1Cu□0.1Ti Membrane with High Strength-Ductility, Antibacterial Ability, Cytocompatibility, and Osteogenesis for Biodegradable Guided Bone Regeneration Applications. *Adv Funct Mater* [Internet]. 2023 Apr

- 28;n/a(n/a):2214657. Available from: <https://doi.org/10.1002/adfm.202214657>
24. Liu W, Du B, Tan S, Wang Q, Li Y, Zhou L. Vertical guided bone regeneration in the rabbit calvarium using porous nanohydroxyapatite block grafts coated with rhveg165 and cortical perforation. *Int J Nanomedicine*. 2020;15:10059–73.
 25. Dau M, Volprich L, Grambow E, Vollmar B, Frerich B, Al-Nawas B, et al. Collagen membranes of dermal and pericardial origin—In vivo evolvment of vascularization over time. *J Biomed Mater Res Part A* [Internet]. 2020 Dec 1;108(12):2368–78. Available from: <https://doi.org/10.1002/jbm.a.36989>
 26. Si J, Shen H, Miao H, Tian Y, Huang H, Shi J, et al. In vitro and in vivo evaluations of Mg-Zn-Gd alloy membrane on guided bone regeneration for rabbit calvarial defect. *J Magnes Alloy* [Internet]. 2021;9(1):281–91. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213956720302036>
 27. Terzopoulou Z, Baciu D, Gounari E, Steriotis T, Charalambopoulou G, Tzetzis D, et al. Composite Membranes of Poly(ϵ -caprolactone) with Bisphosphonate-Loaded Bioactive Glasses for Potential Bone Tissue Engineering Applications. Vol. 24, *Molecules*. 2019.
 28. Zhou X, Cheng X, Xing D, Ge Q, Li Y, Luan X, et al. Ca ions chelation, collagen I incorporation and 3D bionic PLGA/PCL electrospun architecture to enhance osteogenic differentiation. *Mater Des* [Internet]. 2021;198:109300. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127520308364>
 29. Lee J, Lee J, Lee S, Ahmad T, Madhurakkat Perikamana SK, Kim EM, et al. Bioactive Membrane Immobilized with Lactoferrin for Modulation of Bone Regeneration and Inflammation. *Tissue Eng Part A* [Internet]. 2020 Apr 13;26(23–24):1243–58. Available from: <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2020.0015>
 30. van Oirschot BAJA, Jansen JA, van de Ven CJJM, Geven EJW, Gossen JA. Evaluation of Collagen Membranes Coated with Testosterone and Alendronate to Improve Guided Bone Regeneration in Mandibular Bone Defects in Minipigs. *J Oral Maxillofac Res*. 2020;11(3):1–16.
 31. Wang J, Zhan L, Zhang X, Wu R, Liao L, Wei J. Silver Nanoparticles Coated Poly(L-Lactide) Electrospun Membrane for Implant Associated Infections Prevention [Internet]. Vol. 11, *Frontiers in Pharmacology*. 2020. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphar.2020.00431>
 32. Demyashkin G, Kogan E, Borozdkin L, Demura T, Shalamova E, Centroev Z, et al. Immunohistochemical and morphological characteristics of tissues response to polylactic acid membranes with silver nanoparticles. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2020 Jan;25(1):e29–33.
 33. Zhou T, Chen S, Ding X, Hu Z, Cen L, Zhang X. Fabrication and Characterization of Collagen/PVA Dual-Layer Membranes for Periodontal Bone Regeneration [Internet]. Vol. 9, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2021. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.630977>
 34. Steigmann L, Jung O, Kieferle W, Stojanovic S, Proehl A, Görke O, et al. Biocompatibility and Immune Response of a Newly Developed Volume-Stable Magnesium-Based Barrier Membrane in Combination with a PVD Coating for Guided Bone Regeneration (GBR). Vol. 8, *Biomedicines*. 2020.
 35. Higuchi J, Klimek K, Wojnarowicz J, Opalińska A, Chodara A, Szałaj U, et al. Electrospun Membrane Surface Modification by Sonocoating with HA and ZnO:Ag Nanoparticles—Characterization and Evaluation of Osteoblasts and Bacterial Cell Behavior In Vitro. Vol. 11, *Cells*. 2022.
 36. Jo YK, Choi BH, Zhou C, Jun SH, Cha HJ. Cell recognitive bioadhesive-based osteogenic barrier coating with localized delivery of bone morphogenetic protein-2 for accelerated guided bone regeneration. *Bioeng Transl Med* [Internet]. 2023 May 1;8(3):e10493. Available from: <https://doi.org/10.1002/btm2.10493>
 37. Tasiopoulos CP, Petronis S, Sahlin H, Hedhammar M. Surface Functionalization of PTFE Membranes Intended for Guided Bone Regeneration Using Recombinant Spider Silk. *ACS Appl Bio Mater* [Internet]. 2020 Jan 21;3(1):577–83. Available from: <https://doi.org/10.1021/acsabm.9b00972>
 38. Ejeian F, Razmjou A, Nasr Esfahani MH, Mohammad M, Karamali F, Warkiani ME, et al. ZIF-8 modified polypropylene membrane: A biomimetic cell culture platform with a view to the improvement of guided bone regeneration. *Int J Nanomedicine*. 2020;15:10029–43.
 39. Luo Q, He X, Duan X, Liu H, Zhou Z, Cheng K. A Facile Synthesis of P(VDF-TrFE)-Coated-PMMA Janus Membranes for Guided Bone Regeneration. Vol. 12, *Coatings*. 2022.

40. Kim SY, Kim YK, Jang YS, Lee MH. Enhancement of Biofunctionalization by Loading Manuka Oil on TiO₂ Nanotubes. Vol. 12, Nanomaterials. 2022.
41. Fernandes R, Damasceno M, Pimentel G, Mendonça J, Gelfuso M, da Silva Pereira S, et al. Development of a membrane for guided tissue regeneration: An *in vitro* study. Indian J Dent Res [Internet]. 2020 Sep 1;31(5):763–7. Available from: <https://www.ijdr.in/article.asp?issn=0970-9290>