

Utilization of biopolymers from palm oil waste in dental innovation

Pemanfaatan biopolimer dari limbah kelapa sawit dalam inovasi kedokteran gigi

¹Muhammad Sahid Munawir, ²Nurul Arifah Newmonikasaray Ukkas, ³Adeline Payung Allo, ⁴Lenni Indriani, ⁵Alqarama Mahardhika Thalib, ⁶Maya Masyita

^{1,2,3}Mahasiswa Program Studi Profesi Dokter Gigi,

^{4,5,6}Dapertemen Marine Dentistry, Universitas Hasanuddin
Makassar, Indonesia

Corresponding author. e-mail: ¹Msaahid750@gmail.com

ABSTRACT

Oil palm biomass (OPB) has emerged as a highly promising lignocellulosic resource. Utilizing OPB waste to produce advanced biomaterials, such as nanocellulose and lignin, offers opportunities for transformative innovation in sustainable dental materials. This literature review was compiled based on inclusion criteria that focused on primary and secondary studies published in leading scientific journals (not theses or non-peer-reviewed articles) that addressed the use of oil palm waste-derived biopolymers OPB, particularly nanocellulose and lignin, in biomedical and dental applications. These materials exhibit good biocompatibility, are biodegradable, and actively support tissue regeneration (as evidenced by increased ALP activity). The use of palm oil enables the development of *smart materials* that combine structural support (from cellulose/lignin) with therapeutic functions (antimicrobial and antioxidant properties from palm oil derivatives) to prevent biofilm infection and oxidative damage.

Keywords: biopolymer, palm oil, dentistry

ABSTRAK

Biomassa kelapa sawit (*oil palm biomass*/OPB) telah muncul sebagai sumber daya lignoselulosa yang sangat menjanjikan. Pemanfaatan limbah OPB untuk menghasilkan biomaterial canggih, seperti nanoselulosa dan lignin, menawarkan peluang untuk mentransformasi inovasi dalam bahan dental yang berkelanjutan. Kajian literatur ini disusun berdasarkan kriteria inklusi yang berfokus pada studi-studi primer dan sekunder yang diterbitkan dalam jurnal-jurnal ilmiah terkemuka dan membahas pemanfaatan biopolimer turunan limbah kelapa sawit, terutama nanoselulosa dan lignin, dalam aplikasi biomedis dan kedokteran gigi. Bahan ini menunjukkan biokompatibilitas yang baik, mampu terdegradasi, dan secara aktif mendukung regenerasi jaringan (terbukti dari peningkatan aktivitas ALP). Pemanfaatan OPB memungkinkan pengembangan *smart materials* yang menggabungkan dukungan struktur dari selulosa/lignin dengan fungsi terapeutik (antimikroba dan antioksidan dari turunan minyak kelapa sawit) untuk mencegah infeksi biofilm dan kerusakan oksidatif.

Kata kunci: biopolimer, kelapa sawit, kedokteran gigi

Received: 10 June 2026

Accepted: 15 July 2026

Published: 1 August 2026

PENDAHULUAN

Bidang kedokteran gigi terus mencari bahan baru yang tidak hanya kuat secara mekanis, tetapi juga biokompatibel, dapat terdegradasi, dan berkelanjutan.¹ seiring meningkatnya prosedur restoratif dan regeneratif.² Terdapat kebutuhan mendesak untuk mengatasi keterbatasan bahan konvensional.³ Prosedur restoratif tradisional sering membutuhkan pengurangan struktur gigi sehat yang signifikan untuk retensi mekanis,⁴ yang meningkatkan risiko komplikasi jangka panjang seperti sensitivitas, fraktur, dan perlunya perawatan saluran akar.⁵

Di bidang regeneratif, khususnya *guided bone regeneration* (GBR) dan pencangkokan tulang dental, tantangan utama adalah menemukan biomaterial yang ideal.⁴ Meskipun *autogenous bone block* merupakan *gold standard*^{8,9} prosedur ini mahal, memiliki risiko infeksi, dan memerlukan waktu penyembuhan yang panjang; hingga 9 bulan. Kegagalan integrasi *graft* juga merupakan risiko signifikan yang dapat menyebabkan kegagalan implan gigi.⁴

Menanggapi tantangan ini, penelitian biomaterial beralih ke sumber daya terbarukan.¹⁰ Biomassa kelapa sawit (*oil palm biomass*/OPB) telah muncul sebagai sumber daya lignoselulosa yang sangat menjanjikan.¹¹ Indonesia dan negara-negara penghasil kelapa sawit lainnya menghasilkan biomassa yang sangat besar; melampaui 100 juta ton per tahun secara global¹² yang utamanya terdiri atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin.¹³ Pemanfaatan limbah OPB untuk menghasilkan biomaterial canggih, seperti nanoselulosa dan lignin,¹ menawarkan peluang untuk mentransformasi inovasi dalam bahan dental yang berkelanjutan.¹⁴

Artikel ini membahas pemanfaatan biopolimer turunan limbah kelapa sawit, terutama nanoselulosa dan lignin, dalam aplikasi biomedis dan kedokteran gigi.

METODE

Narrative literature review yang disusun secara sistematis dan terstruktur untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, serta mensintesis temuan ilmiah terkini mengenai pemanfaatan biopolimer turunan lim-

bah kelapa sawit dalam bidang biomedis dan kedokteran gigi. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis komprehensif terhadap karakteristik bahan, mekanisme biologis, serta potensi aplikatif dari berbagai jenis biopolimer tanpa dibatasi oleh satu desain penelitian eksperimental tertentu.

Penelusuran pustaka dilakukan melalui beberapa basis data ilmiah bereputasi internasional, antara lain PubMed/PMC, ScienceDirect, MDPI, Frontiers, dan ResearchGate. Pencarian artikel menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Inggris, seperti OPB, *nanocellulose*, *cellulose nanofiber*, *lignin*, *biopolymer*, *biomaterial*, *dentistry*, *guided bone regeneration*, dan *dental applications*. Kata kunci tersebut dikombinasikan dengan operator Boolean (AND, OR) untuk memperluas sekaligus memfokuskan hasil pencarian agar relevan dengan tujuan penelitian.

Kriteria inklusi mencakup 1) artikel penelitian primer dan sekunder yang dipublikasikan dalam jurnal ilmiah *peer-reviewed*; 2) studi yang membahas biomassa kelapa sawit atau turunannya (nanoselulosa, lignin, atau biopolimer terkait); 3) penelitian yang mengevaluasi karakteristik kimia, mekanik, biologis, atau bioaktivitas bahan; 4) studi yang memiliki relevansi langsung atau potensial terhadap aplikasi biomedis dan kedokteran gigi; serta 5) artikel yang diterbitkan dalam rentang waktu 2020-2025 untuk menjamin kebaruan dan relevansi data.

Sebaliknya, kriteria eksklusi meliputi 1) publikasi *non-peer-reviewed* seperti tesis, disertasi, laporan teknis, atau artikel populer; 2) artikel yang tidak tersedia dalam teks lengkap; 3) studi yang hanya membahas aspek agronomi atau industri kelapa sawit tanpa kaitan dengan biomaterial; serta (4) publikasi dengan data yang tidak lengkap atau metodologi yang tidak dijelaskan secara memadai.

Seleksi literatur dilakukan secara bertahap. Tahap pertama melibatkan penyaringan judul dan abstrak untuk menghilangkan artikel duplikat serta publikasi yang tidak relevan. Tahap kedua berupa evaluasi teks lengkap untuk memastikan kesesuaian artikel dengan kriteria inklusi dan tujuan tinjauan. Artikel yang lolos tahap ini kemudian dianalisis secara kualitatif dengan mengekstraksi data utama yang

meliputi jenis OPB, metode ekstraksi dan karakterisasi biopolimer, sifat fisik dan mekanik, kinerja biologis (biokompatibilitas, osteogenik, dan antimikroba), serta potensi aplikasinya dalam bidang dental.

Data yang diperoleh selanjutnya disintesis secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi pola temuan, keunggulan bahan, serta keterbatasan yang masih ada. Penyajian hasil metodologi dan studi kunci dirangkum dalam bentuk tabel untuk memudahkan perbandingan antar penelitian dan meningkatkan kejelasan alur analisis.³

HASIL

Pencarian pustaka awal dilakukan melalui basis data PubMed/PMC, ScienceDirect, MDPI, Frontiers, dan ResearchGate menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan sehingga diperoleh sekitar 72 artikel. Setelah dilakukan penghapusan duplikasi dan penyaringan judul serta abstrak, sebanyak 49 artikel dinyatakan relevan untuk ditelaah lebih lanjut. Selanjutnya, evaluasi teks lengkap dilakukan berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Hasilnya, 35 artikel memenuhi seluruh kriteria inklusi dan digunakan dalam proses sintesis serta analisis kualitatif pada kajian ini (Tabel 1).

Komposisi kimia

Analisis komposisi biomassa menunjukkan bahwa fraksi limbah kelapa sawit memiliki kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang bervariasi, menjadikannya bahan baku yang melimpah (Tabel 2).¹³

Nanocellulose yang diisolasi menunjukkan pengurangan ukuran ke skala nanometer,¹⁹ dengan diameter 1–6 nm dan berbentuk seperti batang.¹⁹ Teknik persiapan lain menghasilkan partikel sferis dengan ukuran 42–82 nm yang masih mengandung lignin.¹² Lignin yang diekstrak dari pelepah kelapa sawit (OPF-lignin) menunjukkan stabilitas termal yang luar biasa, mencapai suhu dekomposisi hingga 633,5°C,¹ yang jauh lebih tinggi daripada nanoselulosa, yang mengalami degradasi termal 173,3–454,27°C karena adanya gugus sulfat.¹⁹ Lignin yang diekstrak memiliki pemulihan tertinggi (49,7%) dari serat mesokarp.¹

Kinerja mekanik, biologis, dan antimikroba

Nanocellulose (CNF) berhasil digunakan sebagai pengisi (*filler*) untuk meningkatkan kinerja mekanik komposit polimer,²³ termasuk pe-

nikkatan kekuatan tarik hingga 124% pada nanokomposit tertentu, yang disebabkan oleh interaksi ikatan hidrogen antara nanofiller selulosa dan matriks polimer. Studi *in vitro* membandingkan nanofiber selulosa (CNF) turunan tumbuhan dengan membran kontrol komersial (GC Membrane/PLGA) untuk aplikasi GBR/GTR²⁴ (Tabel 3).

1) Sifat mekanik: CNF menunjukkan sifat mekanik yang lebih baik secara keseluruhan dibandingkan GC Membrane,¹ dengan membran CNF tebal 0,2 mm menunjukkan kekuatan tarik yang jauh lebih tinggi.¹ Namun, kekuatan CNF tetap lebih rendah daripada Titanium (Ti).¹

2) Aktivitas osteogenik (ALP): CNF menunjukkan biokompatibilitas yang baik,⁴ dengan ekspresi alkaline phosphatase (ALP) meningkat secara signifikan pada hari ke-14 dan ke-21,¹ tetapi aktivitas ALP CNF masih lebih rendah daripada GC Membrane pada hari ke-21.¹

3) Aktivitas antimikroba: komposit berbasis CNF menunjukkan aktivitas antibakteri yang tinggi terhadap patogen umum, termasuk bakteri Gram-positif (*Bacillus subtilis*) dan Gram-negatif (*Escherichia coli*).

PEMBAHASAN

Biopolimer alami memainkan peran penting dalam rekayasa jaringan,² yang bertujuan untuk menciptakan pengganti biologis fungsional guna memulihkan atau meningkatkan jaringan yang rusak.¹⁷ Keunggulan utama biopolimer, seperti selulosa, kitosan, dan asam hialuronat,¹⁷ terletak pada sifatnya yang biokompatibel, dapat terdegradasi, dan potensi untuk meniru *extracellular matrix* (ECM) alami.¹⁷ Bahan-bahan ini dapat difabrikasi menjadi berbagai bentuk, termasuk hidrogel, film, dan *nanoparticle*,²³ yang mendukung pertumbuhan, migrasi, dan diferensiasi sel.²⁰

Meskipun polimer sintetik, seperti PLA, PGA, PCL, menawarkan kekuatan mekanik yang memadai,²⁶ biopolimer alam menawarkan manfaat tambahan berupa non-toksik dan keberlanjutan.¹⁰ Peningkatan teknologi biomaterial saat ini sedang berupaya meningkatkan kinerja produk akhir biopolimer hingga setara dengan polimer sintesis,²⁸ yang dapat dicapai melalui modifikasi kimia dan fisik yang tepat.²⁷

Valorasi lignoselulosa OPB menjadi nanomaterial fungsional

Limbah OPB adalah residu lignoselulosa kompleks¹³ dan merupakan biomassa terbarukan yang komposisinya bervariasi berdasar-

Tabel 1 Ringkasan studi utama (2020–2025)

Penulis, tahun	Judul	Metode Utama yang Digunakan
Chen, Junduo, et al, 2025	<i>Mechanical and biological properties of cellulose nanofibers as a dental biomaterial</i>	Membandingkan CNF (dua ketebalan) dengan GC Membrane (PLGA) dan Ti. Tes mencakup sifat mekanik (kekuatan tarik/fleksural), degradasi, biokompatibilitas (MC3T3-E1, HGF-1), dan aktivitas <i>alkaline phosphatase</i> (ALP) pada hari ke-14 dan ke-21.
Padzil, Farah Nadia Mohammad, et al., 2024	<i>Potential of oil palm empty fruit bunch resources in nanocellulose hydrogel production for versatile applications: a review</i>	Tinjauan kritis analitis (bukan studi eksperimental) yang fokus pada mekanisme bioaktivitas (antimikroba dan antioksidan) turunan minyak sawit dan potensi penggabungannya ke dalam biomaterial dental dan farmasi.
Abel, Stasha Eleanor Rosland, et al, 2024	<i>Extraction and assessment of lignin from lignocellulosic oil palm biomass</i>	Ekstraksi lignin dari berbagai fraksi OPB (OPEFB, OPF, OPMF, OPT) menggunakan 72% asam sulfat pekat (metode standar TAPPI). Karakterisasi dilakukan dengan SEM-EDX, TGA, dan FTIR untuk mengukur pemulihan, morfologi, dan stabilitas termal.
Norrahim, Mohd Nor Faiz, et al, 2021	<i>Emerging development of nanocellulose as an antimicrobial material: an overview</i>	Uji antibakteri untuk menentukan nilai <i>Minimum Inhibitory Concentration</i> (MIC50) komposit terhadap bakteri Gram-positif (<i>B. subtilis</i>) dan Gram-negatif (<i>E. coli</i>).

Tabel 2 Komposisi kimia utama berbagai fraksi limbah kelapa sawit (wt%)

Fraksi Limbah	Selulosa (%)	Hemiselulosa (%)	Lignin (%)	Sumber
Tandan Kosong (EFB)	43–65	17–33	13–37	Diyanilla R, Hamidon TS, et al
Pelepah (Fron)	40–50	34–38	20–21	Diyanilla R, Hamidon TS, et al
Batang (Trunk)	29–37	12–17	18–23	Diyanilla R, Hamidon TS, et al

Tabel 3 Perbandingan kinerja CNF nanofiber turunan tumbuhan dengan membran komersial untuk aplikasi GBR/GTR

Karakteristik	CNF Turunan Tumbuhan	Membran GC (Kontrol, PLGA)	Implikasi Klinis	Sumber
Kekuatan Mekanik Total	Lebih Baik	Inferior	Penting untuk stabilitas & mempertahankan ruang	Hu, Tao, et al.
Kekuatan Tarik (0,2 mm)	Jauh Lebih Tinggi	Rendah	Mengurangi risiko robek selama prosedur	Hu, Tao, et al.
Stabilitas Pascaperendaman	Kekuatan ber(-), hidrofilisitas meningkat	-	Modifikasi untuk stabilitas oral jangka panjang	Hu, Tao, et al.
Aktivitas ALP (Hari ke-21)	Terangkat Signifikan (Meningkat)	Lebih Tinggi dari CNF	Memerlukan fungsionalisasi untuk mencapai laju osteogenesis optimal	Hu, Tao, et al.

kan fraksi biomassa yang digunakan.¹³ Komponen selulosa, yang paling melimpah,² diisolasi melalui perlakuan alkalinisasi, menggunakan NaOH,²¹ untuk menghilangkan hemiselulosa dan lignin,¹⁹ diikuti dengan hidrolisis asam, menggunakan H₂SO₄,²¹ untuk mengurangi ukurannya menjadi skala nanometer¹⁹ dan meningkatkan kristalinitas.¹⁹

Komponen lignin dapat diekstraksi secara terpisah, misalnya menggunakan asam sulfat pekat 72%¹¹ sesuai metode standar TAPPI.¹¹ Lignin yang diekstrak menunjukkan kemurnian tinggi dan stabilitas termal yang luar biasa hingga 633,5°C,¹¹ menjadikannya kandidat yang menjanjikan sebagai *filler* penguat yang kaku dan stabil secara termal. Selain itu, turunan minyak kelapa sawit kaya akan tocotrienol, tokoferol, dan karotenoid,¹⁸ yang memiliki sifat antioksidan kuat dan efikasi antimikroba luas,¹⁸ sangat penting untuk aplikasi dental.³

Analisis kinerja nanofiber selulosa dalam GBR/GTR

Hasil menunjukkan bahwa nanofiber selulosa (CNF) turunan OPB memiliki potensi nyata sebagai biomaterial membran dental baru, terutama untuk aplikasi GBR/GTR.⁴ Kekuatan tarik CNF yang secara signifikan lebih tinggi daripada membran komersial PLGA¹ menunjukkan keunggulan struktur untuk fungsi *space maintenance* yang sangat penting dalam GBR.³

Namun, tantangan terbesar terletak pada bioaktivitas dan stabilitas. Meskipun CNF mampu mendukung pertumbuhan sel dan meningkatkan ekspresi ALP (penanda diferensiasi osteogenik) secara signifikan,¹ kinerjanya masih lebih rendah dibandingkan membran kontrol komersial pada hari ke-21.¹ Hal ini menggarisbawahi perlunya fungsionalisasi bahan lebih lanjut, mungkin melalui penggabungan agen pendorong osteogenesis, untuk mencapai laju regenerasi tulang yang optimal.¹ Selain itu, penurunan kekuatan mekanik CNF yang nyata setelah perendaman¹ menunjukkan perlunya rekayasa *interface* yang presisi, seperti *cross-linking*, misalnya menggunakan *glutaraldehyde* atau *genipin*,¹⁶ atau hibridisasi dengan polimer lain,³⁰ untuk memastikan integritas struktur di lingkungan oral yang lembab selama periode penyembuhan yang lama.¹

Potensi lignin dan biopolimer hibrida dalam aspek restorasi dan endodontik

Nanomaterial OPB memiliki spektrum aplikasi yang luas di luar regenerasi.²⁵ Dalam bahan restoratif dan prostetik, nanoselulosa dan nanopartikel lignin dapat berfungsi sebagai *filler* inovatif. Lignin, dengan kekakuan dan stabilitas termal yang tinggi,¹ sangat efektif sebagai penguat sebagai pengganti plastik berbasis minyak bumi, meningkatkan peningkatan kekuatan mekanik dan sifat penghalang UV pada komposit polimer. Bahkan abu biokelapa sawit (*oil palm bio-ash*) dapat digunakan sebagai *filler* potensial yang dapat mengurangi volatilisasi dekomposisi termal polimer.³²

Dalam endodontik, biopolimer OPB dapat digunakan sebagai matriks fungsional.²⁰ *Nanocellulose* dan alginat memiliki sifat reologi yang sangat baik,³³ menjadikannya *bioink* yang ideal untuk teknologi pencetakan 3D dalam rekayasa jaringan.²⁰ *Sealers* saluran akar ber-

basis alginat yang dikombinasikan dengan *bioactive glass* menunjukkan kekuatan ikatan dorong (*push-out bond strength*) yang lebih tinggi dibandingkan dengan beberapa *sealer* bioceramik komersial.¹⁴ Formulasi nano turunan minyak kelapa sawit sangat penting untuk sistem penghantaran obat yang stabil,¹³ memastikan konsentrasi terapeutik agen antimikroba (misalnya, terhadap *Enterococcus faecalis* atau *Streptococcus sanguinis*),³⁴ dan antioksidan di sistem saluran akar yang kompleks.¹³

Tantangan translasi klinis dan regulasi

Meskipun hasil laboratorium menjanjikan, terdapat hambatan multidimensi yang harus diatasi sebelum bahan berbasis OPB dapat diintegrasikan secara luas dalam praktik klinis,³⁵ yaitu 1) skalabilitas dan standarisasi mutu; transisi dari laboratorium ke produk klinis memerlukan metode produksi yang *scalable* dan *reproducible* untuk memastikan keseragaman dan kualitas bahan.²⁰ Bahan yang berasal dari limbah pertanian memerlukan protokol pemurnian yang sangat ketat untuk menghilangkan kontaminan, seperti endotoksin,³⁵ guna memastikan kepatuhan terhadap standar medis (*medical-grade standards*);³⁵ 2) keamanan dan regulasi nanomaterial. Penggunaan nanomaterial, khususnya *nanocellulose*, menimbulkan kekhawatiran terkait potensi risiko toksisitas pemapasan selama produksi dan penanganan.⁶ Diperlukan penelitian ekstensif lebih lanjut untuk merumuskan protokol keselamatan dan regulasi yang komprehensif;⁶ dan 3) sterilisasi; teknik sterilisasi konvensional (autoklaf atau radiasi) dapat merusak integritas struktur, sifat reologi, dan bioaktivitas biopolimer,³³ sehingga validasi protokol sterilisasi yang tidak merusak sifat fungsional bahan adalah suatu keharusan.³³

Biopolimer turunan limbah kelapa sawit, terutama *nanocellulose* (CNF/CNC) dan lignin, menawarkan platform bahan yang berkelanjutan dan fungsional untuk inovasi kedokteran gigi.¹⁰ Bahan ini menunjukkan biokompatibilitas yang baik, mampu terdegradasi,²⁵ dan secara aktif mendukung regenerasi jaringan yang terbukti dari peningkatan aktivitas ALP.²⁴ Pemanfaatan OPB memungkinkan pengembangan bahan *smart* yang menggabungkan dukungan struktur dari selulosa/lignin³¹ dengan fungsi terapeutik (antimikroba dan antioksidan dari turunan minyak kelapa sawit)¹⁸ untuk mencegah infeksi biofilm dan kerusakan oksidatif.¹³

Arah penelitian masa depan harus memprioritaskan rekayasa fungsional,² termasuk pengembangan nanokomposit hibrida *nanocellulose-lignin* yang stabil secara mekanik, serta pengujian klinis dan studi *in vivo* komprehensif.³⁵ Penggunaan teknik *cross-linking* canggih³³ sangat penting untuk memastikan stabilitas jangka panjang dalam lingkungan oral yang menantang.²⁴ Dengan mengatasi tantangan rekayasa dan regulasi,³⁵ biopolimer limbah kelapa sawit dapat membuka jalan era baru bahan dental yang berkelanjutan dan terapeutik.

Disimpulkan bahwa pemanfaatan OPB memungkinkan pengembangan bahan *smart* yang menggabungkan dukungan struktur dari selulosa/lignin dengan fungsi terapeutik dari turunan minyak kelapa sawit untuk mencegah infeksi biofilm dan kerusakan oksidatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Hu T, Fang J, Shen Y, Li M, Wang B, Xu Z, Hu W. Advances of naturally derived biomedical polymers in tissue engineering. *Front Chem* 2024;12:1469183.
- Govender N, Abu-Saman I, Mui-Yun W. Root lignin composition and content in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) genotypes with different defense responses to *Ganoderma boninense*. *Agronomy* 2020;10(10):1487.
- Masri S, Mohd N, Abu Kasim NH, Razali M. Mechanistic insight into the antioxidant and antimicrobial activities of palm oil-derived biomaterials: Implications for dental and therapeutic applications. *Int J Molecular Sci* 2025;26(14):6975.
- Elangovan S, Alayan J. Complications associated with guided bone regeneration principles and procedures. *Periodontol* 2000. 2023;93(1):173-82.
- Al-Fouzan AF. Assessment of the invasiveness of different tooth preparation designs for all-ceramic restorations: A finite element analysis. *J Prosthet Dent* 2024;131(2):245-52.
- Bonferoni MC, Caramella C, Catenacci L, Conti B, Dorati R, Ferrari F, et al. Biomaterials for soft tissue repair and regeneration: a focus on Italian research in the field. *Pharmaceutics*. 2021;13(9):1341.

7. Mehanny S, Abu-El Magd EE, Ibrahim M, Farag M, Gil-San-Millan R, Navarro J, et al. Extraction and characterization of nanocellulose from three types of palm residues. *Journal of materials research and technology. J Mater Res Technol* 2021;10:526-37.
8. Moraes G, Zambom WL, Siqueira WL. Nanoparticles in dentistry: A comprehensive review. *Pharmaceut* 2021;14(8):752.
9. Santhamoorthy M, Kim SC. A review of the development of biopolymer hydrogelbased scaffold materials for drug delivery and tissue engineering applications. *Gels* 2021;11(3):178.
10. Flórez M, Cazón P, Vázquez M. Selected biopolymers' processing and their applications: A review. *Polymers*. 2023;15(3):641.
11. Khalil HA, Jawaid M, Hassan A, Paridah MT, Zaidon A. Oil palm biomass fibres and recent advancement in oil palm biomass fibres based hybrid biocomposites. In *Composites and their applications* 2012 Aug 22. IntechOpen.
12. Tajau R, Rohani R, Alias MS, Mudri NH, Abdul Halim KA, Harun MH, et al. Emergence of polymeric material utilising sustainable radiation curable palm oil-based products for advanced technology applications. *Polymers*. 2021;13(11):1865.
13. Diyanilla R, Hamidon TS, Suryanegara L, Hussin MH. Overview of pretreatment methods employed on oil palm biomass in producing value-added products: a review. *BioResources* 2020;15(4):9935.
14. Ma C, Kim TH, Liu K, Ma MG, Choi SE, Si C. Multifunctional lignin-based composite materials for emerging applications. *Front Bioengineer Biotechnol* 2021;9:708976.
15. Lafuente-Merchan M, Ruiz-Alonso S, Espona-Noguera A, Gálvez-Martín P, LópezRuiz E, Marchal JA, et al. Development, characterization and sterilisation of Nanocellulose-alginate(hyaluronic acid)-bioinks and 3D bioprinted scaffolds for tissue engineering. *Mater Sci Engineer* 2021;126:112160.
16. Lin GS, Luddin N, Ghani HA, Lai JC, Noorani TY. Dislodgment resistance, adhesive pattern, and dentinal tubule penetration of a novel experimental algin biopolymerincorporated bioceramic-based root canal sealer. *Polymers* 2023;15(5):1317.
17. Chen J, Ma A, Zhang Y, Sun L, Yang K, Sáenz JR, et al. Mechanical and biological properties of cellulose nanofibers as a dental biomaterial. *J Dent Sci* 2025 Feb 18.
18. Padzil FN, Lee SH, Ainun ZM, Lee CH, Abdullah LC. Potential of oil palm empty fruit bunch resources in nanocellulose hydrogel production for versatile applications: a review. *Mater* 2020;13(5):1245.
19. Abel SE, Loh SK, Wahab NA, Rizuan NI. Extraction and assessment of lignin from lignocellulosic oil palm biomass. In *Palm Oil Industry: Plantation and Process Towards Circular Economy* 2024 Dec 8 (pp. 79-88). Singapore: Springer Nature Singapore.
20. Norrahim MN, Nurazzi NM, Jenol MA, Farid MA, Janudin N, Ujang FA, Yasim-Anuar TA, Najmuddin SU, Ilyas RA. Emerging development of nanocellulose as an antimicrobial material: An overview. *Mater Adv* 2021;2(11):3538-51.
21. Kim S, Hwangbo H, Chae S, Lee H. Biopolymers and their application in bioprinting processes for dental tissue engineering. *Pharmaceut* 2023;15(8):2118.
22. Chieng BW, Lee SH, Ibrahim NA, Then YY, Loo YY. Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from oil palm mesocarp fiber. *Polymers*. 2017;9(8):355.
23. Ghodrati H, Narimani A, Moharami A, Namazikhah M, Gerayeli M, Kermani FA, et al. Nanotechnology and dental composites: revolutionizing dentistry. *Nanomed Res J* 2025;10(1):1-1.
24. Naqvi A, Buch H. Barrier membranes for guided bone regeneration: A comprehensive review of materials, properties, and clinical applications. *J Dent Sci* 2024;19(1):1-12.
25. Omeran AA, Mohammed AA, Sapuan SM, Ilyas RA, Asyraf MR, Koloor SSR, Petru M. Micro-and nanocellulose in polymer composite materials: A review. *Polymers* 2021;13(2):231.
26. Khalil HA, Dungani R, Hossain MS, Suraya NL, Aprilia S, Astimar AA, et al. Mechanical properties of oil palm biocomposites enhanced with micro to nanobiofillers. In *Biocomposites* 2015 Jan 1:401-35). Woodhead Publishing.
27. Chakrabarty A, Teramoto Y. Recent advances in nanocellulose composites with polymers: A guide for choosing partners and how to incorporate them. *Polymers*. 2018;10(5):517.
28. Mohamad Nasir MI, Norhidaya Zakaria NZ, Sipaut CS, Othman Sulaiman OS, Rokiah Hashim RH. Chemical and thermal properties of lignins from oil palm biomass as a substitute for phenol in a phenol formaldehyde resin production.
29. Dias OA, Negrão DR, Silva RC, Funari CS, Cesarino I, Leao AL. Studies of lignin as reinforcement for plastics composites. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2016;628(1):72-8.
30. Fahma F, Lisdayana N, Abidin Z, Noviana D, Sari YW, Mukti RR, et al. Nanocellulose-based fibres derived from palm oil byproducts and their in vitro biocompatibility analysis. *J Textile Institute*. 2020;111(9):1354-63.
31. Abdullah CK, Ismail I, Nurul Fazita MR, Olaiya NG, Nasution H, Oyekanmi AA, et al. Properties and interfacial bonding enhancement of oil palm bioash nanoparticles biocomposites. *Polymers*. 2021;13(10):1615.
32. Chouhan CS, Dagur H, Rahi RK. Nanocellulose from agricultural waste for neonatal and biomedical implant applications. *J Neonat Surg* 2025;14(32s):90-101.
33. Grabowski M, Gmyrek D, Żurawska M, Trusek A. Biopolymers in biotechnology and tissue engineering: a comprehensive review. *Macromol* 2025;5(3):34.
34. Singh G, Saquib S, Gupta A. Environmental, legal, health, and safety issue of nanocellulose. In *Nanocellulose* Mater 2022 Jan 1:265-88. Elsevier.
35. Lin GS, Luddin N, Ghani HA, Lai JCH, Noorani TY. Dislodgment resistance, adhesive pattern, and dentinal tubule penetration of a novel experimental algin biopolymerincorporated bioceramic-based root canal sealer. *Polymers* 2023;15(5):1317.