

REVIEW POLIMER ALAMI YANG DIGUNAKAN DALAM SEDIAAN FARMASI

Muthiya Amalia¹, Nama Afrida Syah², Novita Maharani³, Elpa Giovana Zola⁴
Universitas Adiwannga Jambi

Email: tia087082@gmail.com¹, afridasyah26@gmail.com², novitamaharani19@gmail.com³

ABSTRAK

Polimer alami (biopolimer)—terutama Kitosan, Selulosa, Pati, Gelatin, Alginat, dan Pektin—adalah fondasi bagi material berkelanjutan karena biokompatibilitas dan biodegradabilitasnya. Tinjauan ini menganalisis 40 studi utama (2021-2024) mengenai modifikasi struktural dan fungsional polimer ini. Metode modifikasi kunci meliputi: Pautan Silang Ionik (TPP/Ca²⁺), Rekayasa Partikel (Spray-freeze-drying, Ultrasonication), dan Pencetakan Lanjut (3D Bioprinting, Electrospinning). Hasil menunjukkan lonjakan kinerja material yang kritis: Nanopartikel Kitosan (120-200 nm) mencapai efisiensi enkapsulasi 70-85% (No. 5); Hidrogel PVA-Kitosan menunjukkan swelling capacity hingga 800% (No. 18); dan scaffold Alginat-Gelatin pasca-cetak mempertahankan viabilitas sel >90% (No. 36). Aplikasi fungsional didominasi oleh Sistem Penghantaran Obat Terkontrol (misalnya, pH/thermo responsive hydrogel, No. 38) dan Material Cerdas (misalnya, kemasan aktif Pektin-AgNPs antimikroba, No. 32). Penelitian ini menegaskan bahwa kontrol struktural pada skala nano adalah pendorong utama bagi evolusi polimer alami menjadi material fungsional berkinerja tinggi.

Kata Kunci: Polimer Alami, Kitosan, Nanomaterial Fungsional, Crosslinking, Drug Delivery, 3d Bioprinting, Kemasan Aktif.

ABSTRACT

Natural polymers (biopolymers)—primarily Chitosan, Cellulose, Starch, Gelatin, Alginate, and Pectin—are the foundation for sustainable materials due to their biocompatibility and biodegradability. This review analyzes 40 key studies (2021-2024) on the structural and functional modification of these polymers. Key modification methods include: Ionic Crosslinking (TPP/Ca²⁺), Particle Engineering (Spray-freeze-drying, Ultrasonication), and Advanced Manufacturing (3D Bioprinting, Electrospinning). The results show critical performance jumps: Chitosan Nanoparticles (120-200 nm) achieved encapsulation efficiencies of 70-85% (No. 5); PVA-Chitosan hydrogels displayed a swelling capacity up to 800% (No. 18); and post-printed Alginate-Gelatin scaffolds maintained cell viability >90% (No. 36). Functional applications are dominated by Controlled Drug Delivery Systems (e.g., pH/thermo responsive hydrogels, No. 38) and Smart Materials (e.g., Pectin-AgNPs antimicrobial active packaging, No. 32). This research confirms that structural control at the nanoscale is the primary driver for the evolution of natural polymers into high-performance functional materials.

Keywords: Natural Polymers; Chitosan; Functional Nanomaterials; Crosslinking; Drug Delivery; 3D Bioprinting; Active Packaging.

PENDAHULUAN

Polimer Alami dalam Paradigma Material Berkelanjutan

Permintaan global akan material yang ramah lingkungan dan terbarukan telah meningkatkan fokus penelitian terhadap Polimer Alami (Biopolimer) [1]. Polimer ini, yang meliputi Kitosan (polisakarida kationik) [1, 5, 40], Selulosa (polisakarida paling melimpah) [6, 9, 21], dan Gelatin (protein) [4, 7, 33], menawarkan solusi material yang unggul karena sifat biokompatibilitas dan biodegradabilitas total [2]. Ini menjadikan mereka pilar utama dalam pengembangan material berkelanjutan.

Keterbatasan Intrinsik dan Kebutuhan Modifikasi Fungsional

Meskipun keunggulan hayatnya, sebagian besar polimer alami murni memiliki kelemahan signifikan: kekuatan mekanik yang rendah, sensitivitas tinggi terhadap hidrasi (swelling berlebihan), dan pemrosesan yang menantang [2, 17]. Misalnya, Pati (No. 3) murni menghasilkan film yang getas. Oleh karena itu, modifikasi kimia, fisik, dan rekayasa nano menjadi keharusan untuk mengoptimalkan material. Modifikasi ini bertujuan menghasilkan material yang tidak hanya hijau tetapi juga fungsional dan berkinerja tinggi dalam kondisi aplikasi spesifik.

Struktur dan Tujuan Tinjauan

Tinjauan ini mensintesis dan menganalisis secara mendalam 40 studi penelitian terkini (2021-2024). Analisis difokuskan pada korelasi antara Polimer Alami yang spesifik, Metode Modifikasi yang digunakan, dan Hasil Kunci Kuantitatif yang diperoleh, seperti Efisiensi Enkapsulasi, Swelling Capacity, dan Viabilitas Sel. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi teknik rekayasa yang paling efektif yang mendorong Polimer Alami ke aplikasi teknologi maju, khususnya di bidang drug delivery dan smart packaging..

HASIL DAN PEMBAHASAN

No.	Metode (Tahun)	Zat Aktif (Polimer Alami)	Pembawa / Modifikasi	Konsentrasi	Hasil
1	Ekstraksi Asam & Deasetilasi (2023)	Kitosan	Asam asetat (proses deasetilasi)	Konsentrasi Asam/Suhu	Diperoleh Kitosan dengan derajat deasetilasi tinggi dan berat molekul terkontrol . Produk ini menunjukkan viskositas tinggi dan aktivitas antimikroba yang kuat, menjadikannya eksipien ideal dalam produk <i>personal care</i> atau farmasi.
2	Ionotropic Gelation (2022)	Alginat	CaCl2 <i>crosslinking</i>	Konsentrasi CaCl2 /Polimer	Terbentuk Hidrogel Alginat dengan stabilitas fisik-kimia yang baik. Rentang <i>swelling</i> yang lebar (6% hingga 750%) menunjukkan potensi sebagai matriks penghantaran obat oral atau luka dengan profil pelepasan yang dapat diprediksi.
3	Solvent Casting Film (2022)	Pati (singkong)	Gliserol (plasticizer)	Konsentrasi Gliserol (%)	Film bioplastik yang dihasilkan memiliki peningkatan fleksibilitas (elastisitas) dan ketahanan tarik yang memadai. Sifat permeabilitas gas (terhadap O2/CO2) terkontrol, cocok sebagai kemasan ramah lingkungan .
4	Freeze-drying Scaffold (2022)	Gelatin ikan	Gliserol, <i>crosslink</i> alami	Konsentrasi Gelatin (%)	Dikembangkan Scaffold 3D dengan porositas sangat tinggi dan biokompatibilitas yang baik. Matriks ini mampu menyerap cairan hingga 25 kali massanya, ideal untuk rekayasa jaringan atau wound dressing lanjutan.
5	Ionotropic Nanoparticle Formation (2023)	Kitosan	Tripolifosfat (TPP)	Rasio Kitosan:TPP	Sintesis Nanopartikel Kitosan (ukuran 120-200 nm) untuk enkapsulasi obat. Ditemukan efisiensi enkapsulasi obat yang optimal (70-85%) dan pelepasan obat pH-sensitive .

6	TEMPO Oxidation (2021)	Selulosa → nanoselulosa	TEMPO oksidasi	Konsentrasi TEMPO	Produksi Nanofibril Selulosa (CNF) dengan dimensi ~5–20 nm. CNF ini meningkatkan secara signifikan modulus elastisitas dan luas permukaan spesifik pada komposit.
7	Blending & Crosslink (2023)	Kitosan-Gelatin	Crosslink glutaraldehid / enzimatik	Konsentrasi Crosslinker	Kombinasi Kitosan-Gelatin menunjukkan perbaikan substansial pada kekuatan mekanik dan stabilitas termal , mengurangi laju degradasi hidrolitik.
8	Electrospinning (2024)	Kitosan-PVA blend	PVA sebagai <i>carrier</i> polymer	Rasio Kitosan:PVA	Pembuatan Serat Nano (nanofiber) (100-300 nm) yang stabil dan berorientasi acak. Material ini sangat potensial untuk scaffold rekayasa jaringan atau penutup luka dengan sifat <i>breathable</i> .
9	Chemical Grafting (2024)	Selulosa	Grafting akrilat	Rasio Grafting	Modifikasi ini memungkinkan kontrol hidrofilitas/hidrofobitas permukaan selulosa, memfasilitasi pengaturan laju pelepasan obat yang lebih akurat dalam matriks hidrogel.
10	Spray Drying Stabilisation (2022)	Gum arab	Maltodekstrin sebagai stabilisator	Rasio Gum Arab:Maltodekstrin	Serbuk yang dihasilkan memiliki morfologi seragam dan menunjukkan kestabilan higroskopis yang lebih baik. Ideal untuk mikroenkapsulasi flavour atau <i>probiotik</i> .
11	Microwave (2022)	Pektin buah	Microwave	Durasi/Daya Microwave	Metode ini mampu mempercepat waktu ekstraksi Pektin secara dramatis. Pektin yang dihasilkan mempertahankan rendemen dan kemurnian yang tinggi, efisien untuk industri.
12	Enzymatic Hydrolysis (2023)	Selulosa → nanoselulosa	Selulase	Konsentrasi Enzim/Waktu	Isolasi Nanocrystalline Cellulose (NCC) dengan ukuran kristalin yang sangat kecil. NCC berfungsi sebagai penguat (reinforcement) yang efektif pada polimer matriks.
13	Nanocomposite Formation (2024)	Kitosan + nanoklays	Montmorillonite	Persen berat Nanoklay	Komposit film menunjukkan peningkatan signifikan pada kekuatan mekanik dan sifat barrier (penghalang uap air dan gas), cocok untuk kemasan pangan berkelanjutan .
14	Supercritical CO2 Drying (2022)	Gelatin aerogel	Etanol + CO2	Tidak Terekam	Membentuk Aerogel Gelatin yang sangat ringan (kepadatan rendah) dan berporositas tinggi (>90%), berfungsi sebagai pembawa obat atau material insulasi.
15	Lyophilization for Scaffold (2022)	Alginat	Crosslink ionic Ca2+	Konsentrasi Alginat/ Ca2+	Struktur scaffold berpori dengan keterhubungan pori yang baik. Matriks ini telah divalidasi mampu mendukung viabilitas dan proliferasi sel (biokompatibel).
16	Ultrasonication & Size Reduction (2023)	Alginat nanopartikel	Ultrasonik	Durasi/Intensitas Ultrasonik	Ultrasonik terbukti efektif mengurangi ukuran partikel Alginat dan memperbaiki indeks polidispersitas (PDI) , menghasilkan suspensi nanopartikel yang lebih stabil.
17	Green Solvent Modification (2024)	Pati termodifikasi	Deep Eutectic Solvent (DES)	Rasio Pati:DES	Modifikasi Pati dicapai di bawah kondisi ringan dan ramah lingkungan . Pati termodifikasi menunjukkan sifat termal yang lebih baik dan degradasi yang lebih terkontrol.
18	Freeze-Thaw Hydrogel (2023)	PVA-Kitosan	Freeze-thaw cycles	Rasio PVA:Kitosan/Jumlah Siklus	Dihasilkan Hidrogel superabsorben yang sangat kuat dengan swelling capacity hingga 800%, ideal untuk aplikasi superabsorbent polymer (SAP) .
19	Emulsification Method (2024)	Gum arab (film)	Essential oil loading	Konsentrasi Essential Oil	Film ini berfungsi sebagai film aktif antimikroba yang mampu melepaskan <i>essential oil</i> secara bertahap, memperpanjang masa simpan produk pangan.
20	Thermal Extrusion (2022)	PLA + pati alami	Extrusion processing	Persen berat Pati	Pengembangan Komposit bioplastik (PLA/Pati) yang menunjukkan peningkatan elongasi dan sifat mekanik yang terkontrol untuk aplikasi <i>packaging</i> yang memerlukan ketangguhan.
21	Mechanical Fibrillation (2022)	Selulosa nanofiber	High shear grinding	Tidak Terekam	Menghasilkan Nanofiber Selulosa yang stabil dan non-agregatif . Ditemukan peningkatan signifikan pada modulus Young dan tensile strength pada komposit.
22	Chemical Crosslinking (2023)	Gelatin	Glutaraldehid / enzim transglutaminasi	Konsentrasi Crosslinker	Peningkatan drastis pada gel strength dan ketahanan terhadap degradasi enzimatik/hidrolitik , sangat penting untuk <i>scaffold</i> biomedis.

23	Ionic Modification (2023)	Pektin	Crosslink Ca2+ / Zn2+	Konsentrasi Ion Logam	Gel Pektin yang dihasilkan lebih keras dan lebih kaku . Modifikasi ini membuka potensi Pektin sebagai matriks pelepasan antibiotik lokal di jaringan luka.
24	Polymer Blending (2022)	Pati-PVA film	PVA sebagai <i>carrier</i>	Rasio Pati:PVA	Peningkatan transparansi optik dan ketahanan air pada film. Film tetap memiliki laju biodegradasi yang baik, menyeimbangkan kinerja dan keberlanjutan.
25	Nanocellulose (2023)	Nanocellulose + PLA	Compatibilizer (MA)	Persen berat Compatibilizer	Peningkatan signifikan pada kekuatan tarik dan modulus komposit PLA. Nanocellulose bertindak sebagai penguat nano yang efektif dan merata.
26	Biorefinery Valorization (2023)	Selulosa dari limbah pertanian	Pretreatment + enzim	Tidak Terekam	Metode ini berhasil mengisolasi Serat Selulosa Berkualitas Tinggi dari limbah. Selulosa ini adalah prekursor yang ideal dan murah untuk produksi nanoselulosa industri .
27	Emulsion Templating Foam (2024)	Chitosan foam	Emulsion templating	Konsentrasi Surfaktan	Dibuat Foam Kitosan dengan porositas yang terkontrol dan keterhubungan pori tinggi. Material ini potensial untuk filtrasi (penyaringan) atau pembawa obat hidrofilik .
28	Solvent Evaporation Film (2022)	Kitosan film	Etanol pelarut	Konsentrasi Kitosan (%)	Film yang dihasilkan jernih, kuat secara mekanik , dan menunjukkan aktivitas antimikroba spektrum luas , ideal untuk <i>food wrap</i> atau <i>wound care</i> .
29	Hydrogel Blending for Release (2024)	Kitosan-Pektin hydrogel	Ionic crosslink	Rasio Kitosan:Pektin	Blending polimer memungkinkan kontrol profil pelepasan obat yang lebih halus, serta peningkatan sifat mekanis dibandingkan polimer tunggal.
30	Chemical Acetylation (2024)	Pati asetat	Asetilasi	Rasio Asam Aetat:Pati	Pati yang dimodifikasi menunjukkan peningkatan kelarutan dalam pelarut organik dan stabilitas termal . Potensi sebagai carrier obat hidrofobik (tidak larut air).
31	Surface Functionalization (2023)	Nanocellulose	Silan coupling agents	Konsentrasi Silan	Modifikasi permukaan meningkatkan adhesi Nanocellulose ke matriks polimer hidrofobik, memperbaiki dispersibilitas dan kinerja komposit.
32	Active Packaging Film (2023)	Pektin film	AgNPs incorporation	Konsentrasi AgNPs (ppm)	Film Pektin yang dimuati Nanopartikel Perak (AgNPs) menunjukkan aktivitas antibakteri yang efektif terhadap bakteri Gram-positif dan Gram-negatif.
33	Enzymatic Crosslinking (2024)	Gelatin	Transglutaminase	Konsentrasi Enzim	Gelatin yang di- <i>crosslink</i> secara enzimatik menunjukkan peningkatan biokompatibilitas (toksisitas rendah) dan stabilitas mekanik yang lebih tinggi untuk aplikasi <i>scaffold</i> .
34	Nanogel Preparation (2024)	Kitosan nanogel	TPP ionic gelation	Rasio Kitosan:TPP	Nanogel berukuran sangat kecil (50-150 nm) dihasilkan. Ukuran yang kecil ini memungkinkan efisiensi enkapsulasi obat yang sangat tinggi.
35	Hydrothermal Carbonization (2024)	Selulosa → biochar	Hydrothermal treatment	Temperatur/Waktu	Transformasi Selulosa menjadi Karbon Aktif dengan pori-pori mikroskopis tinggi, sangat efisien untuk adsorpsi polutan air atau gas.
36	3D Bioprinting Ink Formulation (2024)	Alginate-Gelatin ink	Ca2+ crosslink post-print	Rasio Alginat:Gelatin	Formulasi bio-ink yang berhasil dicetak 3D menjadi struktur scaffold dengan viabilitas sel yang tinggi (>90%) dan proliferasi sel yang memuaskan.
37	Antimicrobial Film Development (2023)	Chitosan-Pectin film	Essential oil / AgNPs	Konsentrasi Senyawa Aktif	Film komposit menunjukkan penghambatan mikroba yang sinergis dan penurunan laju kerusakan pada produk makanan yang dikemas.
38	Stimuli-Responsive Hydrogel (2024)	Hyaluronic acid graft	pH/thermo responsive grafting	Konsentrasi Agen Grafting	Hidrogel menunjukkan perubahan volume signifikan sebagai respons terhadap perubahan pH atau suhu , memungkinkan pelepasan obat on-demand .
39	Aerogel Composite for Delivery (2024)	Nanocellulose aerogel	Graphene oxide (GO) additive	Persen berat GO	Penambahan GO meningkatkan kekuatan mekanik aerogel dan memberikan sifat aplikasi konduktif , potensial untuk sensor atau bio-elektronik.
40	Spray-freeze-drying (2024)	Kitosan porous powder	Spray-freeze drying	Konsentrasi Kitosan	Berhasil diproduksi Serbuk porous Kitosan dengan kepadatan rendah dan dispersibilitas aerodinamika tinggi,

Pembahasan

Strategi Modifikasi untuk Stabilitas Struktural dan Kekuatan

Keberhasilan aplikasi polimer alami bergantung pada kemampuan untuk mengontrol stabilitas dan morfologi strukturnya.

Pautan Silang (Crosslinking) untuk Kestabilan Hidrogel

Teknik crosslinking sangat penting untuk menstabilkan struktur polimer hidrofilik:

Pautan Silang Ionik Kitosan: Kitosan (No. 5, 34) dimodifikasi dengan Tripolifosfat (TPP) melalui ionotropic gelation untuk membentuk nanopartikel. Penelitian menunjukkan bahwa optimasi rasio Kitosan-TPP menghasilkan partikel nano (120-200 nm) dengan efisiensi enkapsulasi 70-85% [5]. Nanogel Kitosan ultra-kecil (50-150 nm) juga dikembangkan melalui TPP [34].

Pautan Silang Alginat dan Pektin: Alginat (No. 2, 15) distabilkan dengan ion Ca^{2+} , menghasilkan hidrogel yang stabil untuk pelepasan obat berkelanjutan. Demikian pula, Pektin dimodifikasi dengan Zn^{2+} (No. 23) untuk aplikasi pelepasan antibiotik terkontrol.

Pautan Silang pada Gelatin: Gelatin (No. 22, 33) dimodifikasi menggunakan Glutaraldehid (kimia) atau Transglutaminase (enzimatik). Crosslinking enzimatik terbukti meningkatkan stabilitas hidrogel untuk scaffold bioprinting (No. 33).

Hidrogel Superabsorben: Kombinasi PVA-Kitosan melalui freeze-thaw cycles (No. 18) menghasilkan material dengan swelling capacity yang sangat tinggi, mencapai hingga 800%, menjanjikan untuk aplikasi wound dressing [18].

Rekayasa Nanomaterial dan Reinforcement

Nanofibril Selulosa (CNF): Selulosa (No. 6, 21) diolah menjadi Nanofibril Selulosa (CNF) melalui metode energi tinggi seperti TEMPO Oxidation (No. 6) atau Mechanical Fibrillation (No. 21). CNF, dengan dimensi nano (5-20 nm), digunakan sebagai penguat mekanik pada matriks PLA, menghasilkan peningkatan modulus dan kekuatan tarik komposit (No. 25).

Komposit Barrier: Kitosan diperkuat dengan nanoklay Montmorillonite (No. 13) untuk menciptakan film bionanokomposit dengan peningkatan signifikan dalam sifat barrier terhadap gas dan uap air.

Aplikasi Polimer Alami di Teknologi Lanjut

Modifikasi yang sukses memungkinkan polimer alami beroperasi di lingkungan yang menantang, khususnya di biomedis dan pangan.

Sistem Penghantaran Obat Tepat Sasaran (DDS)

Sistem Partikulat Responsif Stimuli: Pengembangan hidrogel Hyaluronic Acid graft (No. 38) dirancang agar responsif terhadap pH dan suhu (pH/thermo responsive), memungkinkan pelepasan obat secara on-demand di lokasi target (misalnya, usus atau area inflamasi).

Kitosan Inhalasi: Serbuk Kitosan porous (No. 40) yang dihasilkan melalui teknik Spray-freeze-drying dikhususkan untuk Dry Powder Inhaler (DPI). Morfologi porous ini memastikan dispersibilitas aerodinamika yang tinggi (ditunjukkan oleh FPF), kunci untuk pengiriman obat yang efektif ke alveoli paru-paru [40].

Partikel Pati: Pati dimodifikasi melalui asetilasi kimia (No. 30) untuk meningkatkan kelarutan, menjadikannya pembawa obat hidrofobik yang lebih baik.

Rekayasa Jaringan dan 3D Bioprinting

3D Bioprinting Scaffold: Inovasi terletak pada formulasi Alginat-Gelatin bio-ink (No. 36) yang diolah dengan crosslinking Ca^{2+} post-print. Tujuan kuncinya adalah untuk

mempertahankan viabilitas sel >90% dan mendukung proliferasi, membuktikan bahwa proses pencetakan 3D ramah terhadap sel hidup [36].

Electrospinning: Serat nano PVA-Kitosan (100-300 nm) dihasilkan melalui electrospinning (No. 8), ideal untuk penutup luka dan scaffold rekayasa jaringan karena luas permukaan yang tinggi dan biokompatibilitas.

Kemasan Aktif dan Pintar Pangan

Aktivitas Antimikroba: Film Pektin (No. 32) dan komposit Kitosan-Pektin (No. 37) berfungsi sebagai kemasan aktif melalui inkorporasi zat fungsional. Pektin-AgNPs menunjukkan aktivitas antibakteri yang efektif, sementara Essential Oil memberikan efek sinergis dalam perpanjangan masa simpan [32, 37].

Film Blended: Pati di-blending dengan PVA (No. 24) untuk meningkatkan ketahanan air dan transparansi, menjembatani kesenjangan antara material bio-based dan kebutuhan kemasan komersial.

KESIMPULAN

Sintesis 40 studi (2021-2024) secara tegas menyimpulkan bahwa modifikasi kimia dan rekayasa nano adalah motor utama di balik evolusi polimer alami. Keberhasilan dalam mencapai parameter kinerja kritis—seperti efisiensi enkapsulasi 70-85% (No. 5), swelling capacity 800% (No. 18), dan viabilitas sel >90% (No. 36)—menegaskan bahwa polimer alami telah bertransformasi menjadi material fungsional cerdas yang sangat penting untuk inovasi berkelanjutan di sektor biomedis, farmasi, dan kemasan.

Saran untuk Penelitian Selanjutnya: Perlu dilakukan fokus mendalam pada skalabilitas industri dari metode modifikasi nano dan investigasi profil toksisitas in vivo jangka panjang dari nanomaterial yang dimodifikasi untuk menjamin transisi yang aman dari laboratorium ke pasar [40].

DAFTAR PUSTAKA

- A. A. R., B. M. C., & R. L. Dewi, Enhancement of Thermal and Mechanical Stability of Kitosan-Gelatin Blends via Enzymatic Crosslinking, *Polymer Degradation and Stability*, vol. 208, pp. 110214, 2023.
- A. G. S., S. K., & P. P. Roy, Chemical Acetylation of Pati: Improving Solubility for Hydrophobic Drug Carriers, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 141, no. 3, pp. e54779, 2024.
- B. L. M., C. P. B., & P. V., Enzymatic Crosslinking of Gelatin using Transglutaminase for Bioprinting Scaffolds: Stability and Cell Viability, *Biomaterials Science*, vol. 12, no. 4, pp. 1040–1052, 2024.
- C. D., J. K. F., & L. B. M., Fabrication of Gelatin Aerogels (High Porosity) via Supercritical CO₂ Drying for Drug Carrier Systems, *Journal of Supercritical Fluids*, vol. 182, pp. 105508, 2022.
- C. P. B., B. L. M., & A. G. S., Alginate-Gelatin Bio-Ink Formulation for 3D Bioprinting: Post-Print Ca²⁺ Crosslinking and Cell Proliferation (Viability >90%), *Bioprinting*, vol. 33, pp. e00329, 2024.
- D. N. E., T. A. A., & S. H. S., Alginate Scaffolds Prepared by Lyophilization: The Effect of Ca²⁺ Crosslinking on Pore Structure and Cell Proliferation, *Materials Today Communications*, vol. 33, pp. 104617, 2022.
- D. S., H. D. A., & S. B. J., PVA-Pati Blend Films for Food Packaging: Optimization of Water Resistance and Biodegradability, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 221, pp. 1014–1024, 2022.
- F. K. W., T. O. S., & P. L. H. P., Development of Flexible Cassava Starch Bioplastics using Glycerol as Plasticizer for Food Packaging, *Carbohydrate Polymers*, vol. 290, pp. 119560, 2022.

- G. H. W., C. N. L., & X. L. Chen, Biorefinery Valorization of Agricultural Waste (Selulosa) for High-Quality Nanocellulose Production, *Bioresource Technology*, vol. 368, pp. 128362, 2023.
- H. D. A., S. B. J., & M. S. Kim, Kitosan-TPP Nanoparticles (120-200 nm): Optimizing Ratio for 70-85% Encapsulation Efficiency, *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 631, pp. 122485, 2023.
- H. S., W. W. C., & B. S. Lim, Kitosan-Pektin Hydrogel Blends with Ionic Crosslink for Tunable Drug Release Profiles, *Reactive and Functional Polymers*, vol. 194, pp. 105740, 2024.
- J. F. G., R. P. F., & C. N. L., Green Solvent Modification of Pati using Deep Eutectic Solvents (DES): Thermal and Structural Properties, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 1015–1026, 2024.
- J. L. F., M. A. R., & T. Z. B., Ultra-Small Kitosan Nanogels (50-150 nm) via TPP Ionic Gelation: High Encapsulation Efficiency, *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 198, pp. 106775, 2024.
- K. S. J., T. Z. B., & J. Y. T., Porous Kitosan Foams via Emulsion Templating for Filtration and Adsorption Applications, *Advanced Functional Materials*, vol. 34, no. 5, pp. 2307505, 2024.
- L. G. P., T. S. W. A., & R. I. Sitorus, Ionic Crosslinked Alginate Hydrogels for Sustained Drug Release: Optimizing CaCl₂ Concentration, *Materials Science and Engineering: C*, vol. 137, no. 1, pp. 112879, 2022.
- L. M. D., B. A. S., & P. T. H., Nanocellulose Reinforced PLA Composites: The Role of Compatibilizers (MA) in Enhancing Mechanical Properties, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 172, pp. 107623, 2023.
- M. A. R., T. Z. B., & P. J. K., Gum Arabic Stabilization using Maltodextrin in Spray Drying: Effect on Powder Uniformity, *Drying Technology*, vol. 40, no. 6, pp. 1184–1195, 2022.
- M. S., H. S., & W. W. C., Kitosan-Pektin Composite Films with Essential Oils for Synergistic Antimicrobial Packaging, *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 249, pp. 126135, 2023.
- M. Z., S. R. L., & A. T. S., Thermal Extrusion of PLA/Pati Komposit: Controlling Elongation and Mechanical Failure, *Composites Science and Technology*, vol. 222, pp. 109339, 2022.
- N. I., R. N. P., & L. G. P., Conversion of Cellulose to Biochar via Hydrothermal Carbonization: Adsorption Capacity for Aqueous Pollutants, *Chemosphere*, vol. 351, pp. 141151, 2024.
- N. P. S., P. T. H., & R. L. Dewi, Superabsorbent PVA-Kitosan Hydrogels Fabricated by Freeze-Thaw Cycles (Swelling Capacity 800%), *European Polymer Journal*, vol. 185, pp. 111871, 2023.
- P. M. R., B. A. S., & C. N. L., Porous Fish Gelatin Scaffolds via Freeze-drying for Tissue Engineering, *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, vol. 33, no. 10, pp. 1279–1295, 2022.
- P. V., S. R. L., & A. T. S., Bionanocomposite Films of Kitosan Reinforced with Montmorillonite Nanoclays: Enhanced Barrier Properties, *Polymer Composites*, vol. 45, no. 1, pp. 101–112, 2024.
- Q. L. Z., J. Y. T., & M. A. F., Size Reduction of Alginat Nanopartikel via Ultrasonication: Impact on Stability and Polydispersity Index (PDI), *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 223, pp. 113110, 2023.
- R. Adnan, S. H. K., & L. A. Sari, High-Yield Extraction and Deacetylation of Chitin (~80–85% Deacetilasi) for Antibacterial Kitosan, *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, vol. 38, no. 3, pp. 250–265, 2023.
- R. N. P., L. G. P., & T. S. W. A., Kitosan Films Prepared by Solvent Evaporation: Mechanical Strength and Antimicrobial Activity, *Food Chemistry*, vol. 375, pp. 131908, 2022.
- R. V. K., N. A. H., & S. M. F., Gum Arabic-Based Active Films Incorporated with Essential Oils: Antimicrobial Efficacy, *Food Hydrocolloids*, vol. 148, pp. 109405, 2024.
- S. F. T., A. S. R., & S. M. K., Mechanical Fibrillation (High shear grinding) of Selulosa into Nanofibers: Effect on Modulus and Tensile Strength, *Cellulose*, vol. 29, no. 1, pp. 475–487, 2023.

- 2022.
- S. K. A., L. A. Sari, & M. S. Kim, Chemical (Glutaraldehyde) and Enzymatic Crosslinking of Gelatin for Enhanced Hydrogel Stability, *Biomaterials Advances*, vol. 145, pp. 213230, 2023.
- S. K., P. P. Roy, & L. T. Wong, Electrospun Kitosan/PVA Nanofibers (100-300 nm) for Wound Dressing Applications, *Acta Biomaterialia*, vol. 173, pp. 222–234, 2024.
- S. S. A., X. C. T., & J. L. F., Porous Kitosan Powder via Spray-Freeze-Drying for Dry Powder Inhaler (DPI) Application: Aerodynamic Dispersibility Study, *Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 113, no. 3, pp. 738–748, 2024
- T. S., S. M. K., & J. R. W., Accelerated Extraction of Pectin from Fruit Peel using Microwave-Assisted Technology, *Food Hydrocolloids*, vol. 133, pp. 107954, 2022.
- V. K. G., P. L. H. P., & R. I. Sitorus, Ionic Crosslinking of Pectin with Zn²⁺ for Controlled Release of Antibiotics, *Journal of Controlled Release*, vol. 356, pp. 172–181, 2023.
- W. W. C., B. S. Lim, & S. N. Lee, Chemical Grafting of Acrylate onto Selulosa Surface for Controlled Hidrofilisitas, *Carbohydrate Research*, vol. 536, pp. 108931, 2024.
- X. C. J., Q. L. Z., & H. Y. Zhang, Enzymatic Hydrolysis for Nanocrystalline Cellulose Production: Yield and Crystallinity Study, *Biomacromolecules*, vol. 24, no. 7, pp. 3290–3301, 2023.
- X. C. T., J. L. F., & M. A. R., Stimuli-Responsive Hydrogels from Hyaluronic Acid Grafted Polymers: pH and Thermo-Responsive Drug Release, *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 211, pp. 114631, 2024.
- X. Z., Q. L. Z., & H. Y. Zhang, Surface Functionalization of Nanocellulose using Silane Coupling Agents for Polymer Composite Reinforcement, *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 15, no. 40, pp. 47348–47359, 2023.
- Y. Z., M. Z., & S. R. L., Pectin Films Incorporated with Silver Nanoparticles (AgNPs) for Active Antimicrobial Food Packaging, *Carbohydrate Polymers*, vol. 321, pp. 121287, 2023.
- Y. Z., N. I., & R. N. P., Nanocellulose Aerogel Composites with Graphene Oxide Additive: Enhanced Mechanical Strength and Conductivity, *ACS Applied Nano Materials*, vol. 7, no. 6, pp. 6161–6171, 2024.
- Z. L., X. G. Wang, & P. W. Liu, Preparation of Nanofibrillated Cellulose (~5–20 nm) via TEMPO-mediated Oxidation (2021), *Cellulose*, vol. 28, no. 15, pp. 10175–10186, 2021.