

Charlie: Pengembangan Teknologi Pengemasan Aktif Berbasis Nano-Hydroxyapatite (N-Hap) Dari Limbah Lele Pangasius Untuk Memperpanjang Masa Simpan Produk Agro-Industrial Di Indonesia

Charlie: Development Of Active Packaging Technology Based On Nano-Hydroxyapatite Nanomaterial (N-Hap) From Pangasius Catfish For Extending Shelf Life Of Agroindustrial Product In Indonesia

Hanif Yusran Makarim^{1*}, Andian Sandi Pamungkas¹, Alya Fitria Sukma²

¹ Sekolah Ilmu Teknologi Hayati - Program Rekayasa, Institut Teknologi Bandung

² Sekolah Bisnis dan Manajemen, Institut Teknologi Bandung

*email: haaniifysrn@gmail.com

Received: 16 Januari 2025 | Accepted: 30 Januari 2025 | Published: 31 Januari 2025

ABSTRAK

Lonjakan limbah plastik global menjadi ancaman signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan dan kesehatan publik, dengan Indonesia termasuk salah satu penyumbang terbesar polusi plastik. Menjawab tantangan ini, proyek CHARLIE menghadirkan pendekatan inovatif dengan mengubah limbah tulang ikan lele (*Pangasius*) menjadi kemasan aktif biodegradable. Penelitian ini mencakup tiga tahap utama: sintesis nano-hydroxyapatite (n-HAP) melalui pretreatment dan kalsinasi termal, pembuatan biofilm berbasis pati, serta integrasi n-HAP, kitosan, dan polifenol teh ke dalam sistem kemasan aktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa n-HAP memiliki kemurnian tinggi dengan ukuran partikel rata-rata 71,38 nm. Biofilm yang dihasilkan menunjukkan sifat mekanik optimal dengan ketebalan $0,06 \pm 0,01$ mm, kekuatan tarik 13,69 MPa, dan elongasi putus 6,87%. Kemasan aktif ini juga menunjukkan efektivitas antimikroba terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*, serta kapasitas antioksidan mencapai 80%. Analisis ekonomi mengungkapkan bahwa proyek ini layak secara finansial, dengan *Net Present Value* (NPV) sebesar Rp 120.861.676 selama lima tahun pada tingkat diskonto 10%, serta *Return on Investment* (ROI) sebesar 78,22%. Dengan harga jual Rp 5.467,50 per lembar, proyek CHARLIE muncul sebagai solusi berkelanjutan dan layak secara ekonomi untuk mengurangi limbah plastik sekaligus mendukung kebutuhan kemasan agroindustri.

Kata Kunci : nano-hydroxyapatite; biofilm; kemasan aktif; kitosan; polifenol teh

ABSTRACT

The global surge in plastic waste poses significant threats to environmental sustainability and public health, with Indonesia ranking among the highest contributors to plastic pollution. Addressing this crisis, the CHARLIE project introduces an innovative approach by transforming *Pangasius catfish* bone waste into biodegradable active packaging. This study encompasses three major stages: the synthesis of nano-hydroxyapatite (n-HAP) via pretreatment and thermal calcination, the development of starch-based biofilms, and the integration of n-HAP, chitosan, and tea polyphenols into an active packaging system. Results revealed that n-HAP exhibited high purity with an average particle size of 71.38 nm. The resulting biofilm demonstrated optimal mechanical properties with a thickness of 0.06 ± 0.01 mm, tensile strength of 13.69 MPa, and elongation at break of 6.87%. The active packaging showcased antimicrobial efficacy against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*, along with antioxidant activity reaching 80%. Economic analysis highlights the project's feasibility, with a *Net Present Value* (NPV) of Rp 120,861,676 over five years at a 10% discount rate and a robust *Return on Investment* (ROI) of 78.22%. At a selling price of Rp 5,467.50 per sheet, the CHARLIE project emerges as a sustainable and economically viable solution for reducing plastic waste while supporting agro-industrial packaging needs.

Keywords: nano-hydroxyapatite; biofilm; active packaging; chitosan; tea polyphenols

PENDAHULUAN

Di tengah upaya global untuk mengurangi jejak karbon dan memerangi polusi, plastik tetap menjadi tantangan terbesar yang mengancam kelestarian lingkungan dan kesehatan manusia. Setiap tahun, lebih dari 359 juta ton plastik diproduksi, namun hanya sebagian kecil yang berhasil didaur ulang (Tournier *et al.*, 2020). Mengacu pada kondisi di Indonesia, situasi tampak semakin parah—hanya 5% dari limbah plastik yang benar-benar didaur ulang, sementara 70% berakhir di tempat pembuangan akhir atau TPA. (Singh *et al.*, 2022). Dengan efisiensi daur ulang tepat guna yang sangat rendah (5%) dari plastik yang didaur ulang, tidak dapat dipungkiri, Indonesia menghadapi ancaman serius dari plastik terhadap ekosistemnya. Jika dibiarkan, jumlah limbah plastik diproyeksikan akan meningkat setidaknya 2,5 kali lipat dari kondisi saat ini, pada tahun 2060 kelak (Sakaria, 2024; Hahladakis & Iacovidou, 2018).

Meski mungkin tidak terduga, penyumbang terbesar dalam permasalahan ini adalah kemasan produk berbasis plastik, dengan proporsi 40% dari total produksi plastik global digunakan untuk tujuan ini. Sayangnya, hanya 14% dari kemasan plastik yang berhasil didaur ulang secara global (Hahladakis & Iacovidou, 2018; Singh *et al.*, 2022). Ketidakmampuan untuk menangani limbah pengemasan ini tidak hanya menimbulkan masalah lingkungan tetapi juga memiliki dampak jangka panjang pada kesehatan manusia, mengingat pengemasan merupakan salah satu komponen yang paling dekat dengan konsumsi manusia. Senyawa kimia seperti Bisphenol-A (BPA), yang banyak ditemukan dalam plastik, diketahui memiliki pengaruh buruk terhadap tubuh, contohnya mengganggu fungsi hormon endogen yang vital bagi kestabilan tubuh manusia. Sederhananya, hormon-hormon ini bagaikan “mesin” yang menggerakkan keberlanjutan jalur metabolik kelenjar

hipotalamus-pituitari-gonad, sehingga terganggunya fungsi jalur metabolik ini akan menyebabkan disfungsi kelenjar dan memicu imunosupresan pada tubuh yang menurunkan produksi sel T dan ekspresi gen antioksidan. Selain itu, interferensi pada kelenjar hipotalamus juga dapat berujung pada gangguan kognitif berbasis saraf atau *neurodegeneration* (Tarafdar *et al.*, 2022). Tidak hanya itu, mikroplastik BPA juga mampu menyebabkan perubahan DNA metilasi, yang meningkatkan risiko penyakit kronis (Santoro *et al.*, 2019).

Dampak buruk tidak hanya berimbas pada kesehatan tubuh manusia, melainkan juga pada ekosistem lingkungan. BPA misal, dapat menghambat laju penyebaran cahaya pada horizon tanah yang lebih dalam seperti horizon E, B, C—sehingga proses sintesis nutrisi pada tanaman terhambat (Zaborowska *et al.*, 2023). Senyawa berbahaya lain dalam plastik pengemasan seperti *per-and-polyfluoroalkyl-substances* (PFAs) juga berdampak buruk. Hal-hal ini meliputi kemampuan PFAs yang mudah meresap pada jaringan korteks tanaman dan mengganggu jalur penyebaran nutrisi dan air via apoplas dan simplas (Ghisi *et al.*, 2019). Gangguan fungsi ini tidak hanya dapat merusak jaringan tanaman, melainkan juga menurunkan biomassa hasil hingga 40% serta menghambat fotosintesis, contoh pada tanaman selada di penelitian Blaine *et al.* (2013).

Dengan latar belakang tersebut, pengembangan alternatif ramah lingkungan menjadi urgensi yang tidak bisa diabaikan. Salah satu solusi inovatif yang muncul adalah penggunaan bio-material untuk menggantikan plastik berbasis minyak bumi. Salah satu bio-material yang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan plastik adalah hasil olahan limbah tulang ikan lele *Pangasius*, mengingat ketersediaannya yang melimpah.

Menurut Primawestri *et al.* (2023), limbah tulang hasil pengolahan ikan lele di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 129.136,328 ton. Ketersediaan yang melimpah beriringan dengan potensinya

untuk dimanfaatkan. Dalam tulang tersebut, terdapat suatu material nano yang dapat diekstrak, bernama nano-hydroxyapatite (n-HAP). n-HAP merupakan suatu nanomaterial dengan sifat mekanik yang kuat dan kemampuan penghalang terhadap kelembaban (Thool *et al.*, 2024)

Kekurangan yang didapat dari n-HAP adalah kurang mampunya untuk mempertahankan struktur mekanik dan menjaga kualitas produk secara aktif. Kami melihat masalah ini dan menyelidiki potensinya untuk diintegrasikan dengan material lain, pati misalnya. Integrasi n-HAP sebagai basis biofilm dengan pati sebagai penguat struktur, menjadikan hasil biofilm yang cukup kuat sehingga dapat digunakan sebagai pembentuk kemasan agroindustri yang dapat menjadi substitut terhadap pengemasan berbasis plastik (Thool *et al.*, 2024). Kajian ilmiah sebelumnya juga menunjukkan bahwa integrasi n-HAP dengan bahan lainnya seperti kitosan dan polifenol teh dapat meningkatkan sifat aktif kemasan. Secara umum, kitosan memiliki sifat antimikroba yang efektif melawan berbagai patogen makanan, terbukti pada penelitian Duraisamy *et al.* (2025) bahwa kehadiran kitosan sebagai material pengemasan dapat mereduksi populasi mikroba hingga 98% dalam tempo waktu 24 jam. Secara spesifik, kitosan dapat diintegrasikan dengan berbagai material untuk menghadirkan sifat antimikroba, dari bakteri gram positif dan gram negatif sampai fungi atau ragi. Kemampuan kitosan ini dapat dilihat contohnya ketika diintegrasikan dengan *Eucalyptus globulus* sebagai minyak esensial atau *essential oil* (EO) dapat meningkatkan ketahanan terhadap *Escherichia coli* dan *Pseudomonas aeruginosa* selaku bakteri gram negatif, dan *Staphylococcus aureus* dan *Candida albicans* selaku bakteri gram positif. Selain itu, implementasi lain dapat dilihat dengan integrasinya dengan kayu manis (*cinnamon EO*) dapat mempertahankan sifat produk terhadap gangguan fungi *Aspergillus oryzae* dan *Penicillium digitatum* (Florez *et*

al., 2022). Di sisi lain, polifenol teh memberikan perlindungan antioksidan yang memperlambat oksidasi lemak/lipid dalam makanan (Thool *et al.*, 2024).

Dengan memanfaatkan limbah tulang ikan lele, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah plastik, tetapi juga mendorong implementasi ekonomi sirkular yang lebih berkelanjutan. Atas dasar itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengembangkan metode ekstraksi nano-hydroxyapatite (n-HAP) dari tulang ikan lele secara efisien; (2) mengintegrasikan n-HAP, kitosan, dan polifenol teh ke dalam biofilm berbasis pati untuk menghasilkan kemasan aktif yang ramah lingkungan; (3) mengkaji sifat fisik, mekanik, dan aktif dari biofilm yang dihasilkan; dan (4) mengevaluasi kelayakan ekonomi dan dampak lingkungan dari implementasi kemasan aktif berbasis n-HAP.

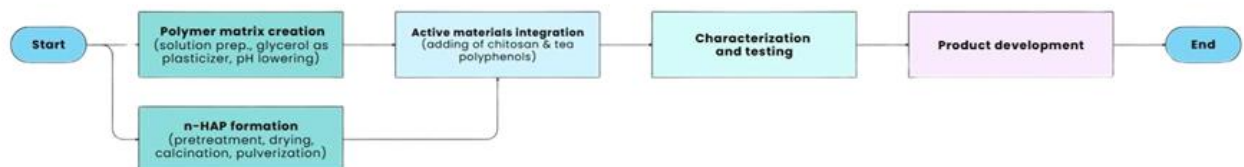
1. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan merupakan pengumpulan data berbasis studi literatur yang dihimpun menjadi suatu rancangan orisinal berbentuk desain kemasan. Desain kemasan kemudian dianalisis secara ekonomis dengan dasar perhitungan harga menggunakan harga pasar yang tersedia di Pulau Jawa.

Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa tulang ikan lele (*Pangasius*) yang diperoleh dari pasar lokal di Indonesia. Bahan tambahan yang digunakan meliputi tepung pati singkong sebagai matriks biofilm, gliserol sebagai *plasticizer* untuk meningkatkan fleksibilitas film, asam asetat 5% untuk menurunkan pH larutan, sodium hidroksida (NaOH) sebagai bahan pretreatment, aseton untuk menghilangkan lemak dan jaringan organik, kitosan sebagai agen antimikroba, serta polifenol teh sebagai bahan aktif antioksidan. Semua bahan memiliki tingkat kemurnian analitis di atas 99%, kecuali asam asetat yang digunakan dalam bentuk larutan 5%.

Mengacu pada jurnal (Thool *et al.*, 2024), peralatan yang digunakan di antaranya: oven laboratorium (Tipe: Memmert UF55) untuk pengeringan bahan, pulverizer laboratorium (Tipe: FZ-102) untuk proses penghalusan n-HAP, spektrometer FTIR (Tipe: Spectrum Two, PerkinElmer) untuk

karakterisasi senyawa, serta pengaduk magnetik (Tipe: MS-H-Pro+) untuk homogenisasi larutan. Selain itu, cetakan akrilik dengan dimensi 17 cm x 10 cm digunakan untuk proses pembuatan biofilm.



Gambar 1. Rancangan proses pembuatan biofilm

2.1. Ekstraksi Nano-hydroxyapatite (n-HAP)

Proses ekstraksi n-HAP mengacu pada penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya oleh Thool *et al.* (2025). Pertama, tulang ikan dikumpulkan, dibersihkan dari jaringan lunak, dan direbus dalam air distilasi selama 3 jam untuk menghilangkan residu organik. Setelah itu, tulang direndam dalam larutan pretreatment yang terdiri dari air distilasi, 2% NaOH, dan aseton dengan perbandingan 10 mL aseton per 100 mL larutan selama 1 jam. Tulang yang telah direndam kemudian dibilas menggunakan air distilasi dan dikeringkan pada suhu 60°C selama 24 jam menggunakan oven laboratorium. Tulang kering selanjutnya dikalsinasi pada suhu 900°C selama 4 jam dengan laju pemanasan 5°C per menit menggunakan calciner laboratorium. Proses kalsinasi ini bertujuan untuk menghilangkan sisa organik sepenuhnya dan menghasilkan n-HAP dengan kemurnian tinggi. Produk akhir n-HAP dihancurkan menjadi bubuk halus menggunakan pulverizer laboratorium.

2.2. Pembuatan Biofilm

Mengadaptasi penelitian Yu *et al.*, (2017) & Thool *et al.* (2024), biofilm berbasis pati dibuat melalui beberapa langkah. Sebanyak 12 gram tepung pati singkong dicampur dengan 100 mL air distilasi dan dipanaskan hingga 90°C selama 30 menit sambil diaduk menggunakan pengaduk magnetik pada kecepatan 700 rpm. Setelah larutan menjadi gelatin, 1,5 mL gliserol dan 1

mL asam asetat 5% ditambahkan ke dalam campuran, kemudian dihomogenisasi pada suhu 70°C selama 15 menit. Larutan dasar ini kemudian ditambahkan kitosan sebanyak 200 g dan polifenol teh sebanyak 20 g. Setelah itu ditambahkan n-HAP dengan variasi konsentrasi sebesar 0,2%, 0,4%, 0,6%, dan 0,8% (w/v). Campuran ini diaduk hingga homogen dan dituangkan ke dalam cetakan akrilik dengan dimensi 17 cm x 10 cm. Proses pengeringan dilakukan menggunakan oven laboratorium pada suhu 45°C selama 48 jam, menghasilkan biofilm dengan ketebalan $0,06 \pm 0,01$ mm.

2.3. Karakterisasi

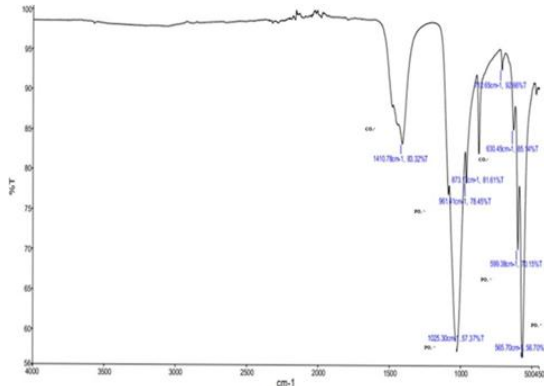
Biofilm yang dihasilkan diuji untuk mengukur sifat fisik, mekanik, serta aktivitas antimikroba dan antioksidan. Ketebalan film diukur menggunakan mikrometer digital (Tipe: Mitutoyo 293-348). Kekuatan tarik dan elongasi putus diukur menggunakan alat uji tarik (Tipe: Instron 5944) sesuai standar ASTM D882 (Upadhyay & Ullah, 2024). Aktivitas antimikroba diuji menggunakan metode zona hambat terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Aktivitas antioksidan diukur menggunakan metode 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) untuk menentukan kapasitas peredam radikal bebas (Yu *et al.*, 2017).

Data yang diperoleh dianalisis secara statistik menggunakan perangkat lunak SPSS. Analisis melibatkan pengujian statistik untuk menentukan pengaruh konsentrasi n-HAP

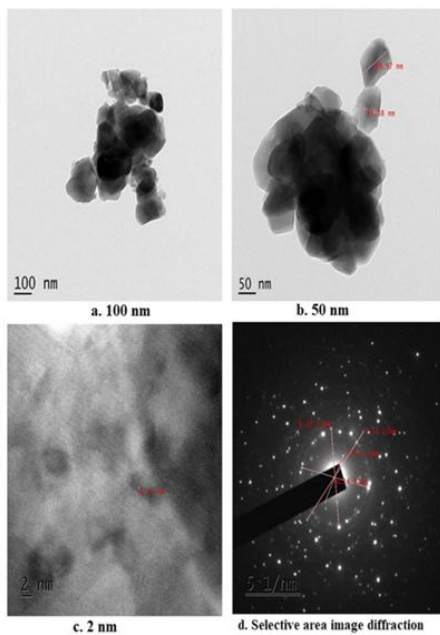
terhadap sifat mekanik, fisik, dan aktif biofilm. Tingkat signifikansi yang digunakan dalam pengujian adalah 95% ($\alpha=0,05$) (Hadi *et al.*, 2022)

2. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil



Gambar 02. Hasil FTI-R n-HAP



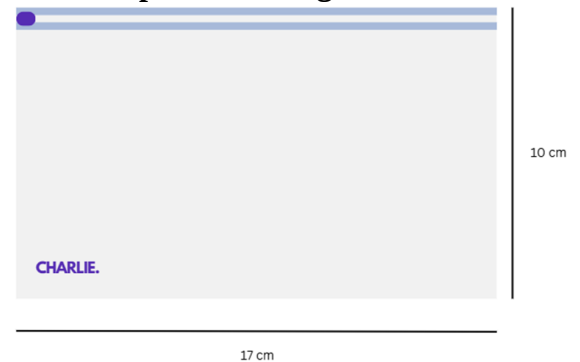
Gambar 03. Hasil penginderaan n-HAP dengan *Transmission Electron Microscopy* (TEM)

Hasil penelitian ini menunjukkan keberhasilan dalam ekstraksi nano-hydroxyapatite (n-HAP) dari tulang ikan lele (*Pangasius*) melalui metode pretreatment dan kalsinasi termal. Karakterisasi menggunakan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) menunjukkan puncak serapan khas

fosfat pada 565,6 cm^{-1} dan 961,4–1025,3 cm^{-1} , serta puncak karbonat pada 873 cm^{-1} dan 1410 cm^{-1} , yang mengindikasikan kemurnian n-HAP yang tinggi dengan hilangnya senyawa organik seperti kolagen (Thool *et al.*, 2025). Selain itu, analisis Transmission Electron Microscopy (TEM) menggunakan perangkat TEM HT7700 menunjukkan bahwa ukuran partikel rata-rata n-HAP adalah 71,38 nm, sesuai dengan kriteria yang dibutuhkan untuk aplikasi biofilm aktif.

Biofilm yang dihasilkan memiliki sifat fisik dan mekanik yang unggul. Ketebalan biofilm berkisar antara 0,05 hingga 0,16 mm, dengan nilai maksimum pada konsentrasi n-HAP 0,8% w/v. Namun, biofilm dengan konsentrasi n-HAP 0,4% w/v menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan tarik (13,69 MPa) dan elongasi putus (6,87%). Uji aktivitas antimikroba terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus* menunjukkan zona hambat sebesar 9,2 mm dan 8,5 mm pada biofilm dengan kitosan 2% dan polifenol teh 0,2% (Hadi *et al.*, 2022).

3.2. Konsep Desain Pengemasan



Gambar 04. Desain pengemasan dengan nama CHARLIE (*Catfish-based nano-Hydroxyapatite Active Packaging for Renewable Lifecycle Integrated Equipment*)

3.3. Pembahasan Efektivitas Ekstraksi n-HAP

Proses ekstraksi n-HAP dari tulang ikan lele menunjukkan efisiensi tinggi dalam menghasilkan material dengan kemurnian yang sesuai untuk aplikasi biofilm. Puncak

fosfat yang dominan pada $961,4 \text{ cm}^{-1}$ dan hilangnya puncak protein organik dalam spektrum FTIR membuktikan keberhasilan proses pretreatment dan kalsinasi (Thool *et al.*, 2025). Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa kalsinasi pada suhu 900°C menghasilkan n-HAP dengan tingkat kristalinitas yang tinggi dibandingkan suhu yang lebih rendah (Yu *et al.*, 2017).

3.4. Pembahasan Karakteristik Fisik dan Mekanik Biofilm

Konsentrasi n-HAP memiliki dampak signifikan terhadap sifat mekanik biofilm. Pada konsentrasi 0,4%, biofilm menunjukkan elongasi putus sebesar 6,87%, yang mencerminkan fleksibilitas optimal untuk aplikasi kemasan. Sebagai perbandingan, penelitian Upadhyay & Ullah (2024) melaporkan bahwa elongasi putus serupa dicapai pada biofilm berbasis pati dengan hidroksiapatit dari sumber berbeda. Selain itu, kekuatan tarik sebesar 13,69 MPa mendekati sifat mekanik *low-density polyethylene* (LDPE), menjadikan biofilm ini sebagai alternatif potensial untuk kemasan plastik.

3.5. Pembahasan Sifat Antimikroba dan Antioksidan sebagai Pengemasan Aktif

Integrasi kitosan dan polifenol teh meningkatkan aktivitas biofilm terhadap mikroorganisme patogen. Dengan pengujian terhadap hasil integrasi dengan konsentrasi polifenol teh 200 mg/L, diperoleh hasil pengujian zona hambat sebesar 9,2 mm terhadap bakteri gram negatif *Escherichia coli* menunjukkan efektivitas antimikroba biofilm, yang sejalan dengan studi Santoro *et al.* (2019) dan Florez *et al.* (2022). Terhadap parameter radikal bebas sebagai penanda kapasitas antioksidan pun dilakukan pengujian dengan menggunakan *bioassay* DPPH, diperoleh hasil sebesar 80% pada konsentrasi nHAP 0,4% (w/v) (Hadi *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2017). Pada parameter konsentrasi lain, diperoleh hasil pengujian menggunakan *bioassay* DPPH yang

bervariasi: 0,2% n-HAP w/v menunjukkan hasil $\sim 70\%$, menunjukkan aktivitas antioksidan yang lebih rendah karena jumlah n-HAP lebih sedikit; 0,6% dan 0,8% n-HAP w/v menunjukkan hasil sekitar 82-85%, namun mengindikasikan telah mencapai batas saturasi (batas pemanfaatan n-HAP secara efisien dalam biofilm) sehingga dapat berujung pada ketidakstabilan komponen lain seperti kitosan dan polifenol teh untuk pemanfaatannya dalam biofilm. Konsentrasi 0,4% n-HAP w/v di sisi lain, sudah cukup stabil karena antioksidannya tidak terlalu tinggi dan sudah mencapai level yang berguna untuk mempertahankan kualitas dari makanan yang rawan teroksidasi, seperti dengan kandungan kacang dan minyak (Siripatrawan, 2016).

3.6. Estimasi Biaya Produksi dan Keuntungan

Item	Formula/Details	Amount (Rp)
Variable cost per biofilm	Given	3,645
Markup (50%)	Variable cost $\times$ 50%	1,822.50
Selling price per biofilm	Variable cost + Markup	5,467.50
Monthly production	2,200 biofilms	-
Monthly revenue	Production $\times$ Selling price	12,028,500
Total variable cost per batch	Given	364,500
Number of batches per month	22	-
Total variable cost per month	$22 \times 364,500$	8,019,000
Monthly profit before fixed cost recovery	Revenue - Variable cost	4,009,500
Equipment & setup costs	Given	61,500,000
Payback period (in months)	Fixed costs $\div$ Monthly profit	15.34 months (~ 1.28 years)
Annual revenue	Monthly revenue $\times$ 12	144,342,000
Annual variable cost	Monthly cost $\times$ 12	96,228,000
Annual gross profit	Revenue - Variable costs	48,114,000
BEP (Units)	Fixed Costs $\div$ (Selling Price - Variable Cost per Unit)	33,757 biofilms
BEP (Revenue)	BEP (Units) $\times$ Selling Price	Rp 184,639,428
Return on Investment	(Annual Profit $\div$ Total Investment) $\times$ 100	78.22%
Net Present Value	$\sum (\text{Cash Flow} \div (1 + r)^t) - \text{Initial Investment}$	Rp 120,861,676

Gambar 05. Rangkuman Estimasi Biaya untuk Produksi Pengemasan CHARLIE

Year (t)	Annual Cash Flow (Rp)	Discount Factor $((1+r)^{-t})$	Discounted Cash Flow (Rp)
1	48,114,000	0.9091	43,740,545
2	48,114,000	0.8264	39,765,818
3	48,114,000	0.7513	36,129,162
4	48,114,000	0.683	32,847,975
5	48,114,000	0.6209	29,878,176
Total	-	-	182,361,676
Initial Investment	-	-	61,500,000
NPV	-	-	120,861,676

Gambar 06. Proyeksi Net Present Value (NPV) dari Produk CHARLIE

Struktur estimasi biaya dari produksi pengemasan CHARLIE ini terdiri dari biaya tetap sebesar Rp 61.500.000, yang mencakup peralatan penting seperti kalsiner, oven laboratorium, dan pulverizer, untuk memastikan kesiapan produksi. Biaya variabel mencapai Rp 364.500 per batch, dengan kapasitas produksi 100 lembar biofilm per batch. Dengan kapasitas bulanan sebesar 2.200 lembar, total biaya variabel bulanan adalah Rp 8.019.000, yang setara dengan biaya produksi per lembar sebesar Rp 3.645.

Harga jual per lembar ditetapkan sebesar Rp 5.467,50 menggunakan markup 50% dari biaya variabel. Dengan harga ini, proyek menghasilkan pendapatan bulanan sebesar Rp 12.028.500 dan laba kotor sebesar Rp 4.009.500 sebelum memperhitungkan biaya tetap. Dalam satu tahun, proyek ini menghasilkan laba tahunan sebesar Rp 48.114.000. Proyeksi keuangan menunjukkan bahwa inisiatif CHARLIE mencapai titik impas setelah menjual 33.757 lembar biofilm, yang setara dengan pendapatan sebesar Rp 184.639.428. Selain itu, biaya tetap dapat kembali dalam waktu sekitar 1,28 tahun atau 15,34 bulan (Tabel 03). Net Present Value (NPV) proyek selama lima tahun adalah Rp 120.861.676 (Tabel 04) dengan tingkat diskonto 10%, dan tingkat pengembalian investasi atau *Return on Investment* (ROI) mencapai 78,22%.

3. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis menyeluruh terhadap proyek CHARLIE, inisiatif ini menawarkan solusi inovatif untuk permasalahan limbah alam dengan mengintegrasikan limbah tulang ikan lele sebagai bahan dasar pengganti plastik berbasis minyak bumi dalam kemasan agroindustri. Sistem kemasan CHARLIE berhasil memadukan limbah organik dan nanomaterial, menciptakan kemasan aktif yang tidak hanya memperkuat kekuatan mekanik melalui penggunaan nano-hydroxyapatite (n-HAP), tetapi juga melindungi kualitas produk agroindustri dengan memanfaatkan sifat antimikroba dari kitosan dan sifat antioksidan dari polifenol teh. Selain kontribusinya terhadap keberlanjutan lingkungan, inisiatif ini juga menunjukkan potensi implementasi bisnis yang menjanjikan. Dengan nilai bersih sekarang (Net Present Value/NPV) selama lima tahun sebesar Rp 120.861.676 pada tingkat diskonto 10% dan tingkat pengembalian investasi (Return on Investment/ROI) sebesar 78,22%, proyek ini terbukti layak secara ekonomi. Harga jual yang ditetapkan sebesar Rp 5.467,50 per lembar biofilm mencerminkan keseimbangan antara keberlanjutan dan profitabilitas, menjadikan CHARLIE sebagai solusi yang relevan untuk kebutuhan kemasan ramah lingkungan di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

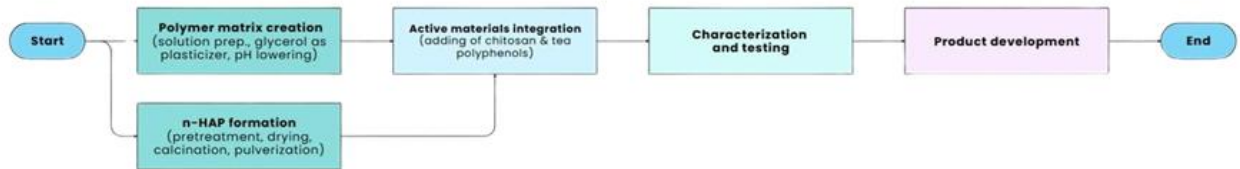
Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada seluruh dosen Sekolah Ilmu Teknologi Hayati (SITH) dan Sekolah Bisnis Manajemen (SBM) Institut Teknologi Bandung yang membimbing keberjalanan riset kami. Meski riset masih dalam tahap perancangan dan modifikasi berdasarkan metodologi studi literatur, kami harap ke depannya dapat diterapkan secara bijaksana untuk menjadikan produk pengemasan yang bermanfaat bagi khalayak ramai.

DAFTAR PUSTAKA

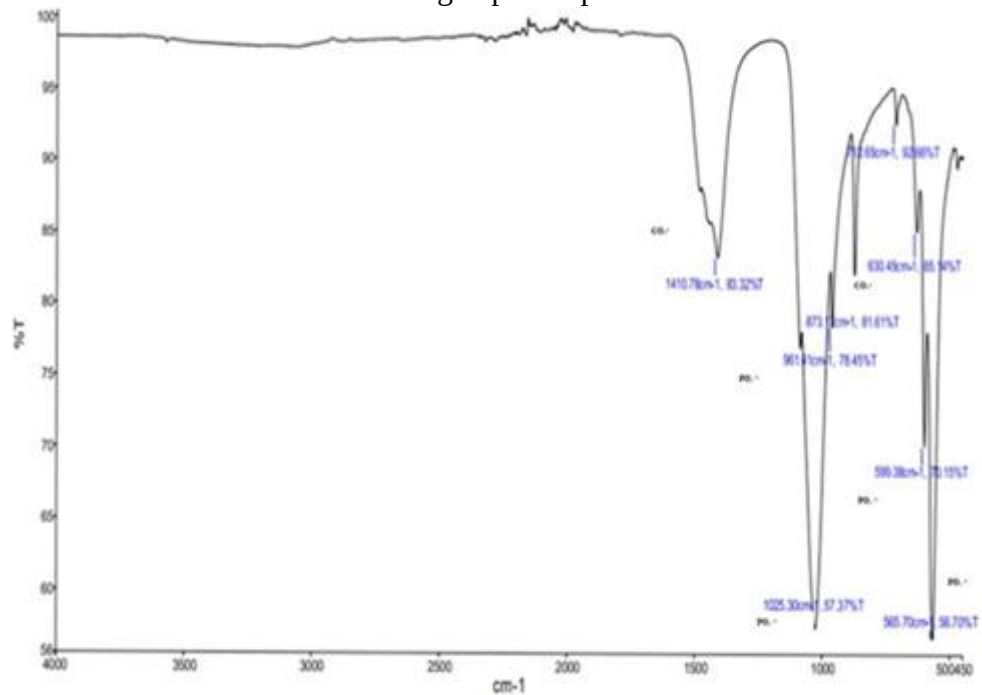
- Blaine, A. C., Rich, C. D., Hundal, L. S., Lau, C., Mills, M. A., Harris, K. M., & Higgins, C. P. (2013). Uptake of perfluoroalkyl acids into edible crops via land applied biosolids: field and greenhouse studies. *Environmental science & technology*, 47(24), 14062-14069.
- Duraisamy, R., Ganapathy, D., Shanmugam, R., Devaraj, E., & Shenoy, A. (2024). Assessment of Antimicrobial Activity of Nanocomposites Based on Nano-Hydroxyapatite (HAP), Chitosan, and Vitamin K2. *Cureus*, 16(1).
- Flórez, M., Guerra-Rodríguez, E., Cazón, P., & Vázquez, M. (2022). Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, 124, 107328.
- Ghisi, R., Vamerali, T., & Manzetti, S. (2019). Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review. *Environmental research*, 169, 326-341.
- Hadi, Z., Hekmat, N., & Soltanolkottabi, F. (2022). Effect of hydroxyapatite on physical, mechanical, and morphological properties of starch-based bio-nanocomposite films. *Composites and Advanced Materials*, 31. 1-10.
- Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2018). Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity?. *Science of the Total Environment*, 630, 1394-1400.
- Pepla, E., Besharat, L. K., Palaia, G., Tenore, G., & Migliau, G. (2014). Nano-hydroxyapatite and its applications in preventive, restorative and regenerative dentistry: a review of literature. *Annali di stomatologia*, 5(3), 108
- Primawestri, M., Sumardianto, S., & Kurniasih, R. A. (2023). Karakteristik stik ikan lele (*Clarias Gariepinus*) dengan perbedaan rasio daging dan tulang. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Perikanan*, 5(1), 44-51.
- Sakaria, M. (2024, 14th of August). *Bioplastik, Solusi Kemasan Plastik Ramah Lingkungan*. Retrieved from <https://katadata.co.id/indepth/opini/66bb046fe5251/bioplastik-solusi-kemasan-plastik-ramah-lingkungan> on 20th of December at 21.05.
- Santoro, A., Chianese, R., Troisi, J., Richards, S., Nori, S. L., Fasano, S., & Meccariello, R. (2019). Neuro-toxic and reproductive effects of BPA. *Current neuropharmacology*, 17(12), 1109-1132.

- Singh, N., Ogunseitan, O. A., Wong, M. H., & Tang, Y. (2022). Sustainable materials alternative to petrochemical plastics pollution: A review analysis. *Sustainable horizons*, 2, 100016.
- Siripatrawan, U. (2016). Active food packaging from chitosan incorporated with plant polyphenols. In *Novel approaches of nanotechnology in food* (pp. 465-507). Academic Press.
- Tarafdar, A., Sirohi, R., Balakumaran, P. A., Reshmy, R., Madhavan, A., Sindhu, R., ... & Sim, S. J. (2022). The hazardous threat of Bisphenol A: Toxicity, detection and remediation. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127097.
- Thool, O. K., Sasidharan, A., Krishna, B. M., Sabu, S., Navaf, M., & Sunooj, K. V. (2025). Nano-hydroxyapatite (n-HAP) from pangasius bone side streams and its application as a reinforcing agent in biodegradable food packaging films. *Sustainable Food Technology*, 1(1), 1-12.
- Tournier, V., Topham, C. M., Gilles, A., David, B., Folgoas, C., Moya-Leclair, E., ... & Marty, A. (2020). An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles. *Nature*, 580(7802), 216-219.
- Upadhyay, P., & Ullah, A. (2024). Enhancement of mechanical and barrier properties of chitosan-based bionanocomposites films reinforced with eggshell-derived hydroxyapatite nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 261, 129764.
- Yu, Z., Alsammarraie, F. K., Nayigiziki, F. X., Wang, W., Vardhanabhuti, B., Mustapha, A., & Lin, M. (2017). Effect and mechanism of cellulose nanofibrils on the active functions of biopolymer-based nanocomposite films. *Food Research International*, 99, 166-172.
- Zaborowska, M., Wyszowska, J., Borowik, A., & Kucharski, J. (2023). Bisphenols—a threat to the natural environment. *Materials*, 16(19), 6500.

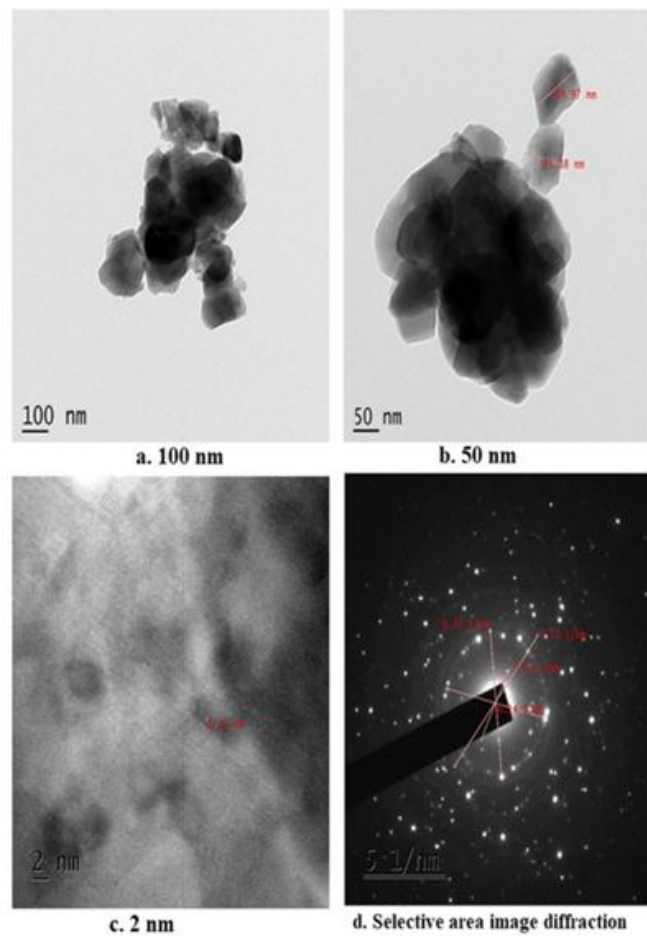
LAMPIRAN



Gambar 01. Rancangan proses pembuatan biofilm



Gambar 02. Hasil FTI-R n-HAP



Gambar 03. Hasil penginderaan n-HAP dengan *Transmission Electron Microscopy* (TEM)



Gambar 04. Desain pengemasan dengan nama CHARLIE (*Catfish-based nano-Hydroxyapatite Active Packaging for Renewable Lifecycle Integrated Equipment*)

Item	Formula/Details	Amount (Rp)
Variable cost per biofilm	Given	3,645
Markup (50%)	Variable cost $\times$ 50%	1,822.50
Selling price per biofilm	Variable cost + Markup	5,467.50
Monthly production	2,200 biofilms	-
Monthly revenue	Production $\times$ Selling price	12,028,500
Total variable cost per batch	Given	364,500
Number of batches per month	22	-
Total variable cost per month	$22 \times 364,500$	8,019,000
Monthly profit before fixed cost recovery	Revenue - Variable cost	4,009,500
Equipment & setup costs	Given	61,500,000
Payback period (in months)	Fixed costs $\div$ Monthly profit	15.34 months (~1.28 years)
Annual revenue	Monthly revenue $\times$ 12	144,342,000
Annual variable cost	Monthly cost $\times$ 12	96,228,000
Annual gross profit	Revenue - Variable costs	48,114,000
BEP (Units)	Fixed Costs $\div$ (Selling Price - Variable Cost per Unit)	33,757 biofilms
BEP (Revenue)	BEP (Units) $\times$ Selling Price	Rp 184,639,428
Return on Investment	(Annual Profit $\div$ Total Investment) $\times$ 100	78.22%
Net Present Value	$\sum (\text{Cash Flow} \div (1 + r)^t) - \text{Initial Investment}$	Rp 120,861,676

Gambar 05. Rangkuman Estimasi Biaya untuk Produksi Pengemasan CHARLIE

Year (t)	Annual Cash Flow (Rp)	Discount Factor $((1+r)^{-t})$	Discounted Cash Flow (Rp)
1	48,114,000	0.9091	43,740,545
2	48,114,000	0.8264	39,765,818
3	48,114,000	0.7513	36,129,162
4	48,114,000	0.683	32,847,975
5	48,114,000	0.6209	29,878,176
Total	-	-	182,361,676
Initial Investment	-	-	61,500,000
NPV	-	-	120,861,676

Gambar 06. Proyeksi Net Present Value (NPV) dari Produk CHARLIE

Untuk kualitas gambar lebih jelas dapat dilihat pada link drive berikut: [LAMPIRAN JOFIT CHARLIE](#)