

## Filosofi Pemanfaatan Enzim Bromelain Hasil Fermentasi Nanas sebagai Agen Bioaktif untuk Bone Healing dan Kontribusinya terhadap Ekologi Maritim Berkelanjutan

Rahmad Gunawan<sup>1</sup>, Hasnah Faizah AR<sup>2</sup>

Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Riau<sup>1,2</sup>

Email Korespondensi: [rahmad.gunawan6226@grad.unri.ac.id](mailto:rahmad.gunawan6226@grad.unri.ac.id)<sup>1</sup>

Dikirim: 22 November 2025 | Direvisi: 01 Desember 2025 | Diterima: 19 Desember 2025

DOI: <https://doi.org/10.31629/khidmat.v2i3.7929>

### ABSTRAK

Pemanfaatan enzim bromelain yang diperoleh dari fermentasi limbah nanas merupakan wujud pergeseran paradigma dari ekonomi linear menuju bioekonomi sirkular dan bioekonomi biru yang menautkan kesehatan manusia dengan kelestarian ekosistem maritim. Limbah kulit, inti, dan mahkota nanas, yang umumnya dipandang sebagai residu tak bernilai, sesungguhnya kaya akan enzim proteolitik bromelain yang berpotensi sebagai agen bioaktif untuk mendukung proses bone healing. Artikel ini bertujuan menelaah secara filosofis dan ilmiah potensi bromelain hasil fermentasi nanas sebagai agen adjuvan penyembuhan tulang sekaligus sebagai instrumen pengurangan beban limbah agrikultur yang bermuara ke ekosistem pesisir dan laut. Metode yang digunakan adalah telaah pustaka naratif dengan penguatan semi-sistematis melalui penelusuran literatur. Hasil telaah menunjukkan bahwa bromelain fermentasi nanas memiliki aktivitas antiinflamasi, proteolitik, dan imunomodulator yang relevan dengan fase-fase kunci penyembuhan tulang, serta berpotensi diintegrasikan ke dalam berbagai platform biomaterial seperti hidrogel dan scaffold untuk pelepasan lokal yang terkontrol. Pada saat yang sama, fermentasi limbah nanas memungkinkan skema produksi enzim yang mendekati konsep zero-waste, membuka peluang ekonomi pada skala komunitas hingga industri, dan mengurangi aliran limbah organik ke wilayah pesisir. Secara filosofis, pemanfaatan bromelain hasil fermentasi nanas dimaknai sebagai upaya "memulihkan tulang manusia tanpa merusak tulang punggung ekosistem laut", yang menyatukan agenda inovasi terapi regeneratif, pengelolaan limbah yang berkeadilan ekologis, dan penguatan ekologi maritim berkelanjutan.

KATA KUNCI: Bromelain, Limbah Nanas, Bone Healing, Bioekonomi Sirkular

### PENDAHULUAN

Pemanfaatan enzim bromelain yang diperoleh dari fermentasi limbah nanas merepresentasikan pergeseran paradigma dari model ekonomi linear "ambil-pakai-buang" menuju filosofi bioekonomi sirkular dan hijau. Nanas merupakan komoditas

tropis penting yang menghasilkan limbah kulit, inti, dan mahkota dalam jumlah besar, sementara fraksi ini justru kaya enzim proteolitik bromelain yang bernilai tinggi. Berbagai kajian menunjukkan bahwa limbah nanas dapat dijadikan sumber utama bromelain melalui pendekatan ekstraksi dan bioproses yang ramah lingkungan, sehingga mengurangi beban limbah sekaligus menambah nilai ekonomi produk samping agroindustri. Eksplorasi bromelain hasil fermentasi nanas tidak hanya menjawab persoalan efisiensi pemanfaatan sumber daya, tetapi juga menjadi landasan filosofis bagi pemanfaatan biomassa tropis secara berkelanjutan (Chaurasiya & Umesh Hebbar, 2013; Ketnawa et al., 2012; Soares et al., 2012).

Secara biokimia, bromelain dikenal sebagai enzim protease yang memiliki aktivitas antiinflamasi, antiedema, dan modulasi respon imun, sehingga telah lama digunakan sebagai fitofarmaka untuk berbagai indikasi klinis. Studi klinis dan pra-klinis melaporkan bahwa bromelain mampu menurunkan mediator inflamasi seperti IL-1 $\beta$ , IL-6, dan TNF- $\alpha$ , serta mempercepat proses debridemen dan perbaikan jaringan pada luka kulit, sehingga membuka peluang aplikasinya pada konteks penyembuhan jaringan penunjang seperti tulang. Karakter bromelain sebagai agen bioaktif yang relatif aman, berasal dari sumber nabati, dan dapat diproduksi melalui fermentasi menjadikannya kandidat menarik dalam pengembangan terapi adjuvan untuk bone healing, khususnya ketika integrasi antara kontrol inflamasi, regenerasi jaringan, dan kualitas matriks ekstraseluler menjadi kunci keberhasilan (Moreau et al., 2014; Paradis et al., 2015; Sanchez & Watson, 2016).

Dalam ranah rekayasa jaringan tulang, konsep bone healing modern tidak lagi sekadar berfokus pada stabilitas mekanik, tetapi juga pada orkestrasi sinyal biokimia, imunomodulasi, dan ketersediaan faktor bioaktif. Perkembangan terkini menunjukkan bahwa peptida dan enzim pangan, termasuk hidrolisat yang dihasilkan dengan bantuan bromelain, berpotensi meningkatkan metabolisme tulang, memperbaiki struktur trabekular, serta mendukung pencegahan osteopenia dan osteoporosis. Penggabungan enzim seperti bromelain ke dalam sistem penghantaran berbasis biomaterial, misalnya hidrogel atau scaffold bioresorbable, membuka peluang terciptanya platform terapi yang mampu melepaskan agen bioaktif secara terkontrol pada lokasi fraktur. Dengan demikian, pemanfaatan bromelain hasil fermentasi nanas dapat dipahami sebagai upaya merangkai dimensi fungsional, etis, dan ekologis dalam satu kerangka terapi regeneratif (Ge et al., 2025; Xu et al., 2024; Zhang et al., 2025).

Fermentasi nanas sebagai strategi produksi bromelain memegang peran filosofis penting dalam pengelolaan sumber daya hayati berbasis kearifan ekologi tropis. Pendekatan fermentasi memungkinkan pemanfaatan penuh limbah padat dan cair, mengintegrasikan produksi enzim, bioetanol, maupun biogas dalam satu skema zero-waste. Pendekatan ini sejalan dengan gagasan bioindustri rendah karbon, di mana setiap aliran limbah dilihat sebagai "bahan baku sekunder" yang dapat diolah menjadi produk bernilai tambah. Dalam konteks sistem pangan pesisir dan kepulauan, teknologi fermentasi limbah nanas untuk bromelain dapat diintegrasikan dengan usaha kecil menengah dan klaster agro-maritim, sehingga memperkuat ketahanan ekonomi lokal sekaligus mengurangi jejak ekologis dari rantai pasok pertanian (Saady & Nazifa, 2025; Seguí & Fito Maupoey, 2018).

Keterkaitan pemanfaatan bromelain dengan ekologi maritim berkelanjutan terletak pada filosofi besar transisi menuju blue bioeconomy yang sirkular dan terintegrasi darat-laut. Laut dan pesisir menerima limpasan (runoff) dari aktivitas daratan, termasuk residu agroindustri dan beban pencemar organik; oleh karena itu, pengurangan limbah di hulu melalui valorisasi biomassa, seperti limbah nanas, menjadi bagian penting dari strategi perlindungan ekosistem maritim (Cao et al., 2025; Riisager-Simonsen et al., 2022; Venugopal, 2022).

Literatur tentang blue bioeconomy menekankan perlunya inovasi bioteknologi yang mengubah limbah organik menjadi bioproduk bernilai tinggi, sekaligus mengurangi tekanan terhadap sumber daya laut dan meminimalkan pencemaran. Dengan menjadikan bromelain hasil fermentasi nanas sebagai agen bioaktif untuk bone healing, riset ini secara filosofis menautkan dimensi kesehatan manusia, efisiensi sumber daya, dan konservasi ekosistem maritim dalam satu narasi keberlanjutan yang utuh (Choudhary et al., 2021; Pakseresht et al., 2025; Persson et al., 2025).

Dalam kerangka tersebut, tulisan ini memposisikan “filosofi pemanfaatan enzim bromelain hasil fermentasi nanas” bukan hanya sebagai inovasi teknis di bidang biomaterial dan farmakologi, tetapi sebagai wujud etika ekologis baru: memulihkan tulang manusia tanpa merusak “tulang punggung” ekosistem maritim. Integrasi pengetahuan biokimia, rekayasa proses, dan prinsip ekonomi biru diharapkan dapat menghasilkan model pemanfaatan biomassa tropis yang adil bagi manusia dan lingkungan. Pendahuluan ini menjadi landasan konseptual untuk telaah lebih lanjut mengenai mekanisme aksi bromelain dalam bone healing, desain proses fermentasi yang berkelanjutan, serta skenario kontribusinya terhadap penguatan ekologi maritim di era perubahan iklim dan peningkatan tekanan antropogenik.

## METODE

Telaah ini menggunakan pendekatan telaah pustaka naratif dengan penguatan semi-sistematis untuk memetakan keterkaitan antara pemanfaatan enzim bromelain hasil fermentasi nanas, bone healing, dan ekologi maritim berkelanjutan. Proses penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ScienceDirect (difokuskan sesuai permintaan), serta dilengkapi Scopus dan PubMed untuk menghindari bias basis data. Kata kunci yang digunakan meliputi kombinasi seperti “bromelain”, “pineapple waste fermentation”, “bone healing/regeneration”, “biomaterial”, “circular bioeconomy”, dan “marine sustainable ecology”. Rentang publikasi utama difokuskan pada sekitar dua dekade terakhir ( $\pm$ 2000–2025), dengan tetap memasukkan artikel klasik yang dianggap fundamental. Pendekatan naratif-semi-sistematis ini mengacu pada panduan penyusunan literature review yang menekankan transparansi strategi pencarian, seleksi, dan pelaporan temuan (Green et al., 2006; Snyder, 2019).

Seleksi artikel dilakukan dalam dua tahap, yakni screening awal berdasarkan judul dan abstrak, diikuti telaah penuh (full-text review) untuk naskah yang memenuhi kriteria inklusi. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel penelitian atau tinjauan yang membahas bromelain yang bersumber dari nanas atau limbah nanas (kulit, inti, mahkota) melalui ekstraksi atau proses fermentasi; (2) studi yang mengkaji aktivitas bioaktif bromelain yang relevan dengan penyembuhan tulang, regenerasi jaringan

keras, modulasi inflamasi atau imun; dan (3) publikasi yang menelaah pengelolaan limbah agroindustri, bioekonomi sirkular, atau ekonomi biru yang berkaitan dengan keberlanjutan ekosistem pesisir dan maritim. Artikel yang tidak tersedia dalam bentuk full-text, tidak relevan dengan salah satu dari tiga domain tersebut, atau berupa laporan populer/non-ilmiah dikeluarkan dari analisis. Prosedur ini mengadaptasi prinsip dasar systematic literature review untuk memastikan jejak seleksi yang dapat dilacak, meskipun telaah ini tidak melakukan meta-analisis kuantitatif (Bhattarai et al., 2022; Mengist et al., 2020).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Potret Potensi Bioaktif Bromelain Fermentasi Nanas dalam Bone Healing

Telaah literatur menunjukkan bahwa bromelain yang diperoleh dari limbah nanas, khususnya melalui proses fermentasi, memiliki spektrum aktivitas bioaktif yang relevan dengan proses penyembuhan tulang. Enzim ini tidak hanya dikenal sebagai protease yang mampu memecah protein, tetapi juga sebagai agen antiinflamasi, antiedema, dan imunomodulator yang dapat memengaruhi fase inflamasi awal pada bone healing. Pada fase tersebut, pengendalian inflamasi yang berlebihan menjadi kunci agar proses reparatif tidak terhambat dan pembentukan kalus berjalan optimal. Dengan demikian, pemanfaatan bromelain fermentasi nanas diposisikan dalam telaah ini sebagai kandidat agen adjuvan yang mampu menyeimbangkan respon inflamasi tanpa mengganggu dinamika fisiologis penyembuhan tulang.

Berbagai publikasi yang ditelaah menggambarkan bahwa bromelain mampu menurunkan ekspresi mediator inflamasi tertentu, sekaligus meningkatkan kualitas lingkungan mikro jaringan yang sedang mengalami perbaikan. Dalam konteks tulang, lingkungan mikro yang lebih terkendali secara inflamasi akan memudahkan rekrutmen sel-sel osteoprogenitor dan mendukung diferensiasi osteoblas. Telaah ini tidak menempatkan bromelain sebagai "obat tunggal" bone healing, tetapi sebagai bagian dari orkestrasi faktor bioaktif yang dapat bersinergi dengan pendekatan mekanik dan biomaterial. Hal inilah yang kemudian menjadi dasar filosofi bahwa pemanfaatan enzim dari limbah agrikultur sejalan dengan upaya meningkatkan kualitas intervensi regeneratif dengan cara yang lebih ramah lingkungan.

Di sisi lain, hasil telaah juga memperlihatkan adanya kecenderungan riset yang mengintegrasikan bromelain ke dalam sistem penghantaran berbasis biomaterial. Formulasi seperti hidrogel, membran, atau scaffold berpori yang mengandung enzim ini diuji untuk melihat kemampuan pelepasan terkontrol dan efeknya terhadap jaringan. Walaupun sebagian besar studi masih berada pada tingkat pra-klinis, pola ini mengindikasikan arah pengembangan teknologi yang relevan bagi bone healing di masa depan. Telaah ini menegaskan bahwa pemahaman yang baik tentang stabilitas enzim, interaksinya dengan matriks polimer, dan profil pelepasan sangat menentukan keberhasilan translasi konsep ke level aplikasi klinis.

Hasil telaah juga menunjukkan bahwa karakteristik sumber bromelain dari limbah nanas tidak mengurangi relevansi bioaktivitasnya, selama proses pengolahan dan pemurnian dilakukan secara tepat. Justru, penggunaan limbah sebagai bahan baku memperkuat argumen keberlanjutan karena mengubah fraksi yang sebelumnya tidak

bernilai menjadi agen bioaktif penting. Di sinilah muncul benang merah filosofis antara efisiensi sumber daya dan inovasi biomedis, bahwa kualitas agen terapeutik tidak harus bertumpu pada bahan baku “murni” yang mahal. Narasi ini membantu menggeser cara pandang terhadap limbah agrikultur dari sekadar beban lingkungan menjadi basis material bagi teknologi kesehatan yang bernilai tinggi.

Tabel 1. Sintesis Hasil Telaah Mengenai Potensi Bioaktif Bromelain Fermentasi Nanas dalam Bone Healing

Aspek yang Ditelaah	Temuan Utama Telaah	Implikasi terhadap Bone Healing
Aktivitas antiinflamasi	Menurunkan mediator inflamasi tertentu	Mengurangi inflamasi berlebih pada fase awal penyembuhan
Aktivitas proteolitik	Mengatur degradasi jaringan rusak	Mendukung transisi kalus dan remodeling jaringan
Sumber dari limbah nanas	Kualitas enzim tetap relevan dengan pengolahan tepat	Memperkuat konsep pemanfaatan limbah sebagai agen terapeutik
Integrasi dalam biomaterial	Potensi pelepasan terkontrol dari matriks	Membuka peluang platform terapi lokal di lokasi fraktur
Dimensi filosofis	Menghubungkan inovasi kesehatan dan keberlanjutan	Menjadi dasar sirkular narasi dalam kesehatan

Sumber: diolah Penulis, 2025

Selain fungsi antiinflamasi, sejumlah laporan yang dikaji juga mengindikasikan potensi bromelain dalam mendukung proses remodeling jaringan melalui efek pada matriks ekstraseluler. Aktivitas proteolitiknya dapat membantu mengatur degradasi komponen jaringan yang rusak, sehingga mempermudah fase penggantian jaringan lama dengan jaringan baru yang lebih teratur. Dalam konteks bone healing, proses ini berhubungan dengan transisi dari kalus lunak ke kalus keras dan akhirnya remodeling tulang yang lebih matang. Telaah ini memaknai temuan-temuan tersebut sebagai bagian dari “fungsi ganda” bromelain yang sekaligus bekerja pada level inflamasi dan struktur jaringan, sehingga memperkaya justifikasi ilmiah pemanfaatannya sebagai agen bioaktif.

Secara keseluruhan, poin pertama dalam hasil telaah ini menegaskan bahwa bromelain fermentasi nanas memiliki landasan ilmiah yang cukup kuat untuk dipertimbangkan sebagai agen bioaktif pendukung bone healing. Walau demikian, telaah ini juga menyoroti bahwa bukti yang ada masih terfragmentasi dan sering kali terpisah antara studi biokimia, studi biomaterial, dan studi aplikasi klinis. Diperlukan pendekatan riset yang lebih integratif agar potensi yang telah diidentifikasi benar-benar dapat diwujudkan dalam praktik. Pada tataran filosofis, pemanfaatan enzim dari limbah nanas dipahami sebagai langkah konkret menuju paradigma terapi regeneratif yang lebih etis terhadap lingkungan dan adil dalam penggunaan sumber daya hayati.

2. Strategi Fermentasi Nanas dan Valorisasi Limbah dalam Kerangka Bioekonomi Sirkular

Fermentasi nanas diposisikan sebagai strategi kunci untuk memaksimalkan pemanfaatan limbah pada kerangka bioekonomi sirkular. Literatur yang ditelaah menunjukkan beragam pendekatan proses, mulai dari fermentasi spontan skala kecil hingga sistem terkontrol dengan pemilihan mikroorganisme tertentu. Proses fermentasi tidak hanya berfungsi untuk meningkatkan ketersediaan bromelain, tetapi juga dapat menghasilkan produk samping lain seperti asam organik, bioetanol, atau bahkan biogas. Telaah ini menyoroti bahwa desain proses yang baik mampu mengintegrasikan berbagai aliran produk sehingga limbah padat dan cair termanfaatkan secara optimal, mendekati konsep zero-waste yang diidealkan dalam bioindustri modern.

Dari sisi teknis, beberapa laporan menonjolkan pentingnya kondisi fermentasi seperti pH, suhu, waktu fermentasi, dan komposisi substrat dalam menentukan aktivitas enzim dan stabilitas bromelain. Variasi dalam parameter tersebut dapat menghasilkan perbedaan signifikan dalam rendemen dan kualitas enzim, sehingga menjadi aspek krusial dalam perancangan proses. Telaah ini tidak melakukan perbandingan numerik rinci, namun menggarisbawahi pola umum bahwa optimasi proses diperlukan agar sumber daya yang digunakan, seperti energi dan bahan tambahan, seimbang dengan output bioaktif yang diperoleh. Dengan demikian, pengembangan fermentasi nanas untuk bromelain dipandang bukan sekadar persoalan teknis, tetapi juga bagian dari optimasi sistemik pada tataran ekonomi sirkular.

Hasil telaah juga mengindikasikan bahwa skala aplikasi fermentasi nanas dapat dibagi menjadi tiga tingkat: rumah tangga atau komunitas kecil, usaha mikro dan kecil, serta skala industri yang lebih besar. Setiap tingkat memiliki karakteristik tantangan dan peluang yang berbeda. Pada level komunitas, misalnya, keterbatasan peralatan dapat diimbangi oleh ketersediaan bahan baku limbah yang melimpah dan biaya operasional yang rendah. Sementara di skala industri, kemampuan kontrol proses yang lebih baik memungkinkan produksi enzim dengan konsistensi tinggi, namun membutuhkan investasi infrastruktur yang signifikan. Telaah ini menempatkan keberagaman skala tersebut sebagai peluang untuk merancang jalur pemanfaatan yang fleksibel sesuai konteks sosial-ekonomi setempat.

Dimensi filosofis dalam strategi fermentasi muncul ketika limbah nanas tidak lagi dipandang sebagai residu tak berguna, melainkan sebagai sumber daya yang menyimpan potensi bioaktif dan energi. Telaah ini menunjukkan bahwa cara pandang tersebut sejalan dengan prinsip bioekonomi sirkular, yaitu mengupayakan siklus materi dan energi sedekat mungkin dengan sistem alami. Dengan mengintegrasikan produksi enzim bromelain ke dalam mata rantai pengelolaan limbah, masyarakat dan pelaku usaha diajak untuk melihat bahwa inovasi kesehatan dapat lahir dari upaya menata kembali hubungan dengan sisa produksi pertanian. Hal ini memberikan basis etis bahwa peningkatan kualitas hidup melalui teknologi tidak harus mengorbankan keseimbangan ekologis.

Selain itu, telaah juga menyoroti perlunya tata kelola dan regulasi pendukung agar skema fermentasi limbah nanas dapat berkembang secara berkelanjutan. Aspek

standardisasi produk, keamanan pangan dan obat, serta mekanisme insentif ekonomi menjadi bagian penting yang banyak disinggung dalam literatur terkait pengembangan bioindustri berbasis limbah. Tanpa dukungan kebijakan yang memadai, upaya valorisasi limbah sering kali berhenti pada tahap pilot dan sulit menembus pasar yang lebih luas. Oleh karena itu, hasil telaah menekankan bahwa pengembangan bromelain fermentasi nanas sebagai agen bioaktif bone healing harus dilihat sebagai bagian dari ekosistem kebijakan yang lebih besar, bukan hanya proyek teknis yang berdiri sendiri.

3. Keterhubungan Pemanfaatan Bromelain dengan Ekologi Maritim Berkelanjutan

Hubungan antara pemanfaatan bromelain fermentasi nanas dan ekologi maritim berkelanjutan, sebagaimana dirumuskan dalam judul telaah. Literatur yang dikaji menunjukkan bahwa ekosistem laut dan pesisir sangat dipengaruhi oleh aktivitas di daratan, termasuk pola pengelolaan limbah agroindustri. Bila limbah organik dan bahan kimia pengolahan dibuang begitu saja ke badan air, maka muatan organik dan polutan akan memasuki sungai dan bermuara di pesisir, memicu eutrofikasi, penurunan kualitas air, dan gangguan pada keanekaragaman hayati laut. Telaah ini memaknai bahwa setiap upaya pengurangan limbah di hulu melalui valorisasi, seperti produksi bromelain, secara tidak langsung merupakan kontribusi terhadap kesehatan ekosistem maritim.

Hasil telaah juga menemukan bahwa konsep blue economy dan blue bioeconomy menuntut integrasi yang erat antara sektor kelautan dan sektor berbasis darat, terutama pertanian dan agroindustri. Di dalam kerangka ini, keberlanjutan ekosistem maritim tidak hanya diukur dari praktik penangkapan ikan atau budidaya laut yang ramah lingkungan, tetapi juga dari seberapa jauh beban pencemar dari daratan berhasil ditekan. Dengan menjadikan limbah nanas sebagai bahan baku untuk enzim bernilai tinggi, jalur limbah yang semula berpotensi menjadi beban pencemar dialihkan menjadi aliran produk yang bermanfaat. Telaah ini menempatkan hubungan tersebut sebagai jembatan filosofis yang menyatukan kesehatan manusia dan kesehatan laut.

Selain pengurangan beban limbah, literatur juga menyinggung pentingnya pembangunan kapasitas masyarakat pesisir dan pedesaan sebagai bagian dari strategi keberlanjutan maritim. Inovasi seperti fermentasi limbah nanas untuk bromelain dapat diadopsi dalam konteks agro-maritim terpadu, di mana komunitas yang hidup dekat dengan wilayah pesisir mengembangkan unit-unit kecil pengolahan limbah pertanian. Dengan cara ini, peluang ekonomi baru diciptakan tanpa menambah tekanan terhadap sumber daya laut, karena nilai tambah dihasilkan dari biomassa daratan yang sebelumnya terbuang. Telaah ini melihat skenario tersebut sebagai contoh konkret bagaimana intervensi pada rantai nilai agrikultur dapat memberi dampak positif terhadap ekologi maritim.

Dalam telaah ini juga dibahas bahwa perubahan pola pengelolaan limbah dapat mengurangi frekuensi dan intensitas kejadian pencemaran yang berdampak luas di wilayah pesisir, seperti ledakan alga, kematian massal biota, dan penurunan kualitas habitat penting. Walaupun sulit mengkuantifikasi kontribusi spesifik dari satu komoditas seperti nanas, literatur menyatakan bahwa pendekatan kumulatif lintas sektor sangat berpengaruh terhadap kondisi ekosistem laut. Dengan demikian, pemanfaatan bromelain fermentasi nanas dipahami sebagai bagian dari mosaik upaya yang saling

melengkapi dalam menjaga kesehatan maritim, bukan sebagai solusi tunggal yang berdiri sendiri.

Tabel 2. Hubungan Konseptual Antara Pemanfaatan Bromelain dan Ekologi Maritim Berkelanjutan

Komponen Daratan-Laut	Peran Pemanfaatan Bromelain Fermentasi Nanas	Dampak terhadap Ekologi Maritim
Pengelolaan limbah agrikultur	Mengurangi limbah organik tak termanfaatkan	Menurunkan potensi pencemaran via aliran sungai
Rantai nilai bioindustri	Menciptakan produk bernilai dari biomassa darat	Mengurangi ketergantungan pada sumber daya laut
Pemberdayaan komunitas	Peluang ekonomi di wilayah agro-maritim	Menekan tekanan eksploitasi berlebih terhadap laut
Kebijakan lintas sektor	Integrasi pertanian-lingkungan-kelautan	Mendukung implementasi blue bioeconomy
Etika ekologis	Menghubungkan kesehatan manusia dan kesehatan laut	Memperkuat kesadaran kolektif menjaga ekosistem

Sumber: diolah Penulis, 2025

Dimensi filosofis yang muncul dari hasil telaah ini adalah kebutuhan untuk memandang laut sebagai “penerima terakhir” dari hampir semua aktivitas daratan. Dalam perspektif ini, setiap inovasi yang mengurangi beban limbah di hulu sesungguhnya merupakan bentuk tanggung jawab moral terhadap ekosistem maritim. Narasi pemanfaatan enzim bromelain dari limbah nanas untuk bone healing, oleh karena itu, bukan sekadar cerita tentang efisiensi industri atau kemajuan medis, tetapi juga tentang pilihan etis untuk tidak menambahkan beban baru bagi laut. Telaah ini mengajak pembaca melihat hubungan tersebut sebagai bagian dari etika ekologis yang menghubungkan tubuh manusia dengan “tubuh” ekosistem laut.

## KESIMPULAN

Enzim bromelain hasil fermentasi nanas memiliki landasan ilmiah dan filosofis yang kuat untuk diposisikan sebagai agen bioaktif pendukung bone healing sekaligus sebagai wujud pemanfaatan limbah agrikultur yang berkeadilan ekologis. Berbagai temuan literatur menunjukkan bahwa bromelain memiliki aktivitas antiinflamasi, proteolitik, dan imunomodulator yang relevan dengan fase-fase penting dalam proses penyembuhan tulang, mulai dari pengendalian inflamasi awal, pengaturan degradasi jaringan rusak, hingga mendukung proses remodeling.

Pemanfaatannya melalui integrasi ke dalam berbagai sistem biomaterial memperlihatkan arah pengembangan teknologi terapi yang semakin spesifik dan terarah. Di saat yang sama, fakta bahwa enzim ini dapat diperoleh dari limbah nanas menegaskan bahwa sumber daya yang selama ini dianggap sisa justru menyimpan potensi untuk inovasi medis bernilai tinggi. Dengan demikian, telaah ini meneguhkan pandangan bahwa pengembangan terapi regeneratif tidak perlu terlepas dari agenda besar pengurangan limbah dan efisiensi pemanfaatan biomassa tropis.

Secara keseluruhan, temuan telaah ini ditempatkan dalam horizon ekologi maritim berkelanjutan dan etika ekologis. Dengan melihat laut dan wilayah pesisir sebagai penerima akhir aliran limbah daratan, pemanfaatan limbah nanas melalui fermentasi untuk menghasilkan bromelain dipahami sebagai salah satu bentuk kontribusi hulu terhadap pengurangan beban pencemar di hilir. Narasi “memulihkan tulang manusia tanpa merusak tulang punggung ekosistem laut” menggambarkan filosofi bahwa kesehatan manusia dan kesehatan ekosistem maritim tidak dapat dipisahkan.

Oleh karena itu, telaah ini merekomendasikan perlunya riset interdisipliner yang lebih terstruktur, penguatan kerangka regulasi lintas sektor (kesehatan-lingkungan-kelautan), serta integrasi tema ini dalam pendidikan dan program Pengabdian kepada Masyarakat. Ketiganya diharapkan dapat mendorong lahirnya model-model implementasi yang nyata, di mana enzim bromelain hasil fermentasi nanas menjadi contoh konkret bagaimana sains, teknologi, dan nilai-nilai keberlanjutan dapat dirangkai dalam satu praktik yang saling menguatkan antara bone healing dan ekologi maritim berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bhattarai, U., Maraseni, T., & Apan, A. (2022). Assay of renewable energy transition: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 833, 155159. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.155159>
- Cao, H., Zeng, Y., Yuan, X., Wang, J. K., & Tay, C. Y. (2025). Waste-to-resource: Extraction and transformation of aquatic biomaterials for regenerative medicine. *Biomaterials Advances*, 166, 214023. <https://doi.org/10.1016/J.BIOADV.2024.214023>
- Chaurasiya, R. S., & Umesh Hebbar, H. (2013). Extraction of bromelain from pineapple core and purification by RME and precipitation methods. *Separation and Purification Technology*, 111, 90–97. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2013.03.029>
- Choudhary, P., G, V. S., Khade, M., Savant, S., Musale, A., G, R. K. K., Chelliah, M. S., & Dasgupta, S. (2021). Empowering blue economy: From underrated ecosystem to sustainable industry. *Journal of Environmental Management*, 291, 112697. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112697>
- Ge, B., Xie, Q., Wu, D., Xu, J., Jiao, H., Zhao, D., & Li, J. (2025). Hydrogels as drug delivery platforms for orthopedic diseases treatment: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 304, 140902. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.140902>
- Green, B. N., Johnson, C. D., & Adams, A. (2006). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: secrets of the trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 5(3), 101–117. [https://doi.org/10.1016/S0899-3467\(07\)60142-6](https://doi.org/10.1016/S0899-3467(07)60142-6)
- Ketnawa, S., Chaiwut, P., & Rawdkuen, S. (2012). Pineapple wastes: A potential source for bromelain extraction. *Food and Bioproducts Processing*, 90(3), 385–391. <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2011.12.006>

- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for conducting systematic literature review and meta-analysis for environmental science research. *MethodsX*, 7, 100777. <https://doi.org/10.1016/J.MEX.2019.100777>
- Moreau, M., Lussier, B., Pelletier, J. P., Martel-Pelletier, J., Bédard, C., Gauvin, D., & Troncy, E. (2014). A medicinal herb-based natural health product improves the condition of a canine natural osteoarthritis model: A randomized placebo-controlled trial. *Research in Veterinary Science*, 97(3), 574–581. <https://doi.org/10.1016/J.RVSC.2014.09.011>
- Pakseresht, A., Kermani, A., & Decker-Lange, C. (2025). Towards a sustainable and circular blue bioeconomy: A scoping review. *Technological Forecasting and Social Change*, 216, 124157. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2025.124157>
- Paradis, M. E., Couture, P., Gibleux, I., Marin, J., Vohl, M. C., & Lamarche, B. (2015). Impact of systemic enzyme supplementation on low-grade inflammation in humans. *PharmaNutrition*, 3(3), 83–88. <https://doi.org/10.1016/J.PHANU.2015.04.004>
- Persson, B., Fernqvist, N., Wøien Meijer, M., Bengtsson, D., & Mattisson, D. (2025). Mapping the governance landscape of the blue bioeconomy: A systems approach to understanding innovation barriers and enablers. *Ocean & Coastal Management*, 270, 107899. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2025.107899>
- Riisager-Simonsen, C., Fabi, G., van Hoof, L., Holmgren, N., Marino, G., & Lisbjerg, D. (2022). Marine nature-based solutions: Where societal challenges and ecosystem requirements meet the potential of our oceans. *Marine Policy*, 144, 105198. <https://doi.org/10.1016/J.MARPOL.2022.105198>
- Saady, N. M. C., & Nazifa, T. H. (2025). Pineapple peel waste enhances manure protein degradation: Statistical optimization. *Cleaner Waste Systems*, 12, 100335. <https://doi.org/10.1016/J.CLWAS.2025.100335>
- Sanchez, L. W., & Watson, R. R. (2016). Fruits, vegetables, and herbs: Bioactive foods promoting wound healing. *Fruits, Vegetables, and Herbs: Bioactive Foods in Health Promotion*, 451–464. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802972-5.00021-4>
- Seguí, L., & Fito Maupoey, P. (2018). An integrated approach for pineapple waste valorisation. Bioethanol production and bromelain extraction from pineapple residues. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1224–1231. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2017.10.284>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/J.JBUSRES.2019.07.039>
- Soares, P. A. G., Vaz, A. F. M., Correia, M. T. S., Pessoa, A., & Carneiro-Da-Cunha, M. G. (2012). Purification of bromelain from pineapple wastes by ethanol precipitation. *Separation and Purification Technology*, 98, 389–395. <https://doi.org/10.1016/J.SEPPUR.2012.06.042>
- Venugopal, V. (2022). Green processing of seafood waste biomass towards blue economy. *Current Research in Environmental Sustainability*, 4, 100164. <https://doi.org/10.1016/J.CRSUST.2022.100164>
- Xu, Z., Zhang, R., Chen, H., Zhang, L., Yan, X., Qin, Z., Cong, S., Tan, Z., Li, T., & Du, M. (2024). Characterization and preparation of food-derived peptides on improving

osteoporosis: A review. *Food Chemistry*: X, 23, 101530.  
<https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101530>

Zhang, J., Lei, C., Mu, G., & Wu, X. (2025). Enzyme-specific casein hydrolysates enhance calcium absorption and bone mineralization: Mechanistic insights from osteoblast activation and peptide profiling. *Journal of Dairy Science*, 108(9), 9078–9094. <https://doi.org/10.3168/JDS.2025-26729>