



SustainaBlue

HEIs stands for Higher Education Institutions

Pengembangan Produk Bernilai Tambah dalam Bioteknologi Kelautan

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Project: 101129136 – SustainaBlue – ERASMUS-EDU-2023-CBHE



Co-funded by
the European Union



UNIVERSITAS
INDONESIA
Veritas, Probitas, Justitia



MITRA PROYEK

Malaysia



Indonesia



Yunani



Siprus



Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Project: 101129136 — SustainaBlue — ERASMUS-EDU-2023-CBHE

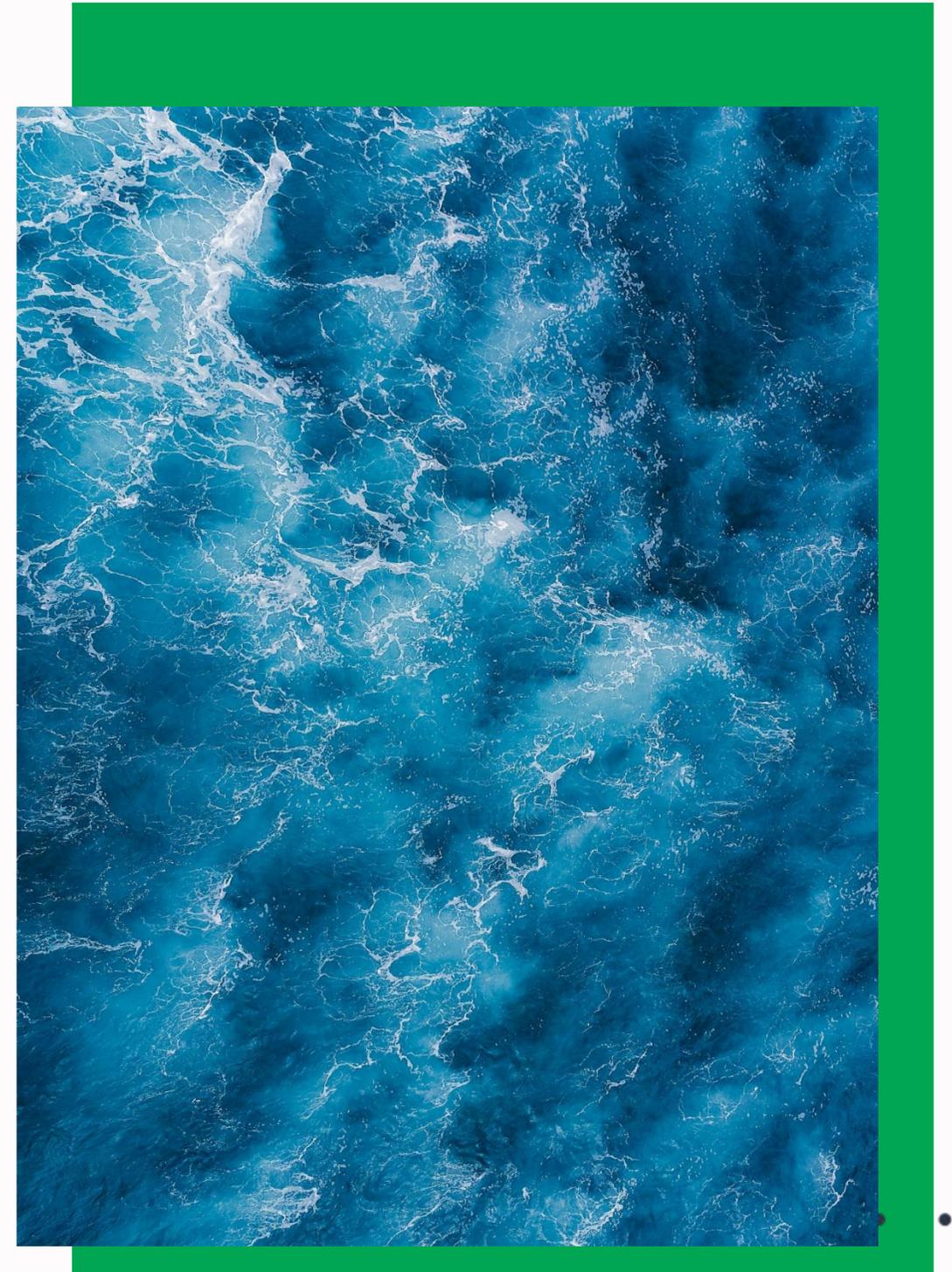


Co-funded by
the European Union



Daftar Isi

- 01 Tinjauan Umum Bioteknologi Kelautan
- 02 Potensi Bioteknologi Kelautan
- 03 Biofuel dan Energi
- 04 Enzim dalam Proses Industri
- 05 Bioremediasi
- 06 Pemantauan Lingkungan
- 07 Bibliografi - Bacaan Lanjutan



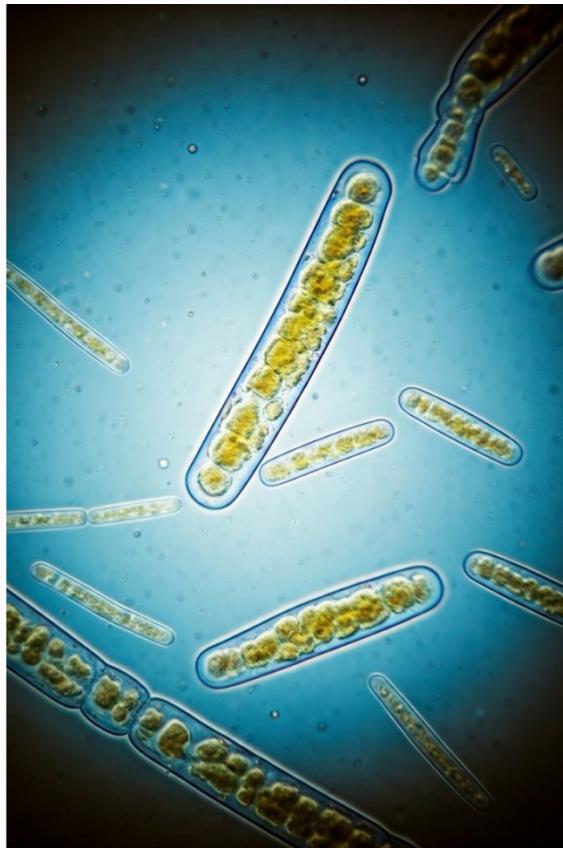
Overview

Definisi Utama

Bioteknologi kelautan, juga dikenal sebagai bioteknologi biru, secara luas didefinisikan sebagai penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi pada organisme hidup dari sumber daya laut, atau bagian, produk, atau model yang diturunkan darinya, untuk menghasilkan pengetahuan, barang, dan jasa (Daniotti et. al 2021 & Freitas et. al. 2012).

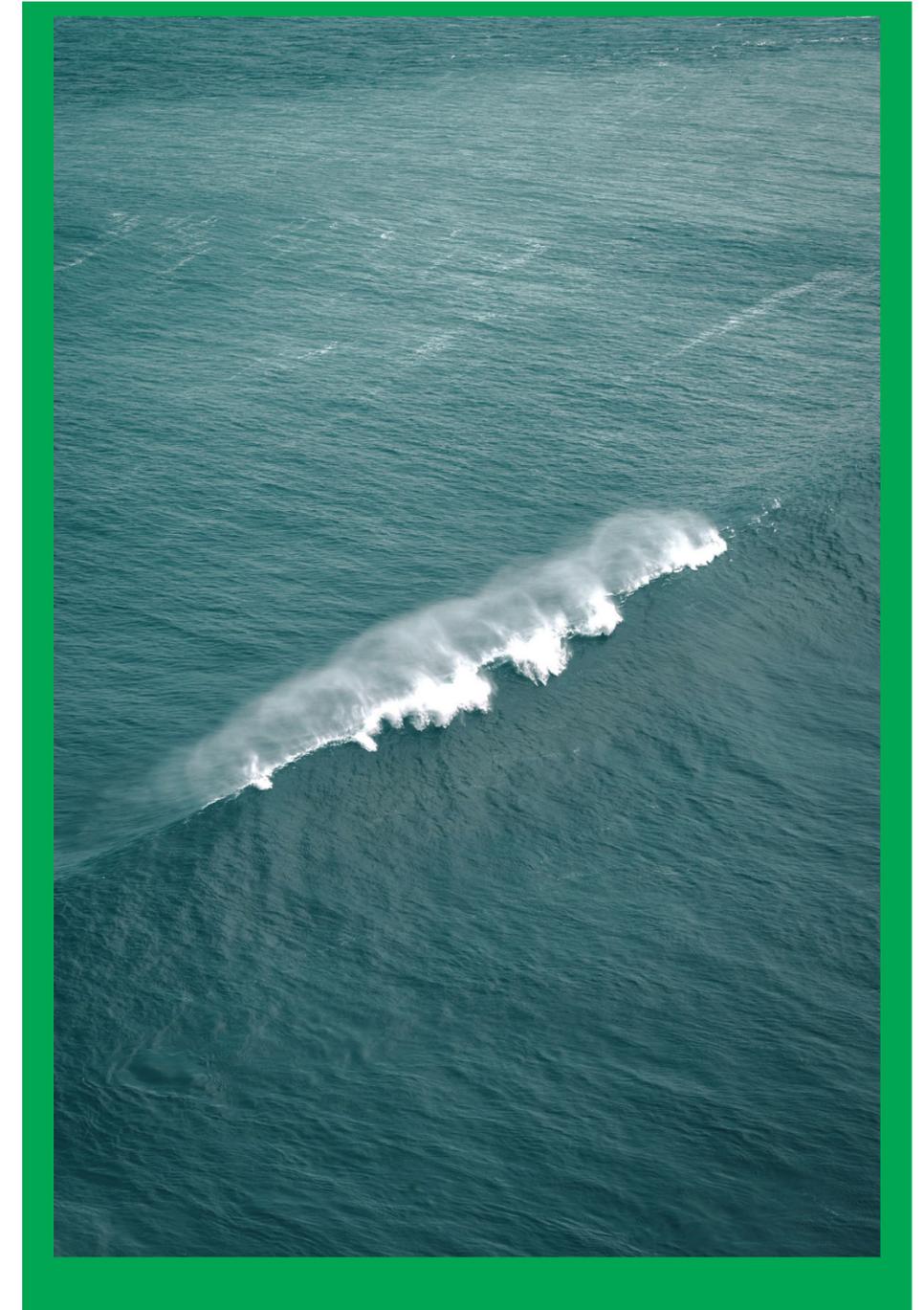
Aplikasi

- Industri Farmasi dan Biomedis
- Industri Makanan dan Nutrasetika
- Biofuel dan Energi
- Enzim dalam Proses Industri
- Bioremediasi dan Pemantauan Lingkungan
- Industri Kosmetik
- Agronomi



Potensi

- **Lingkungan laut meliputi 70% permukaan Bumi** dan merupakan rumah bagi sekitar lebih dari satu juta spesies makroskopis dan sekitar satu miliar spesies mikroorganisme. **Luasnya lautan dan sebagian besar belum dieksplorasi menyebabkan 91% spesies laut belum diklasifikasikan .**
- Banyak produk dari invertebrata laut memiliki potensi sebagai obat, dengan hampir 10.000 entitas molekuler baru teridentifikasi antara tahun 1990 dan 2009.
- **Pasar bioteknologi kelautan menunjukkan tren perkembangan yang positif**, dengan jumlah publikasi ilmiah meningkat lebih dari dua kali lipat dari tahun 2010 hingga 2019. Pertumbuhan yang signifikan diproyeksikan, **dengan perkiraan pertumbuhan tambahan sebesar \$2,5 miliar dari tahun 2020 hingga 2024 secara global, dan lebih dari \$1,3 miliar di Eropa, dengan sektor farmasi dan makanan menyumbang lebih dari 60% nilai pasar.**



Potensi dalam Industri Farmasi dan Biomedis

Obat:

Obat-obatan spesifik yang berasal dari keanekaragaman hayati laut meliputi trabectedin (obat antitumor dari teripang), vidarabine (obat antivirus dari spons laut), cytarabine (agen antileukemia dari spons), dan ziconotide (obat analgesik dari siput kerucut).

Antibiotik dan Antimikroba :

Jamur laut telah menghasilkan banyak senyawa antibakteri dan antijamur, termasuk sefalosporin.

Agen Anti-kanker:

- Senyawa yang berasal dari laut seperti Salinosporamide A (marizomib) dari *Salinispora tropica* sedang dalam uji klinis Fase III sebagai agen antikanker.
- Marinomycins AD dan senyawa dari *Streptomyces sp.*, menunjukkan sitotoksitas yang kuat terhadap garis sel kanker.
- Nukleosida spongothymidine dan spongouridine dari spons laut *Cryptotethia crypta* membentuk dasar untuk Ara-C, agen antikanker awal yang berasal dari laut.

Aplikasi Terapi Lainnya :

Organisme laut dapat menyediakan senyawa untuk mengobati berbagai kondisi, seperti agen anti-inflamasi (misalnya, Siklamarin A dari bakteri laut dan molekul yang menghambat osteoklastogenesis untuk pengobatan osteoporosis, seperti yang terlihat pada ekstrak tiram Pasifik yang difermentasi).



Potensi dalam Industri Farmasi dan Biomedis

Alat Kesehatan dan Biomaterial :

Kolagen yang diekstrak dari ubur-ubur dapat digunakan untuk perangkat medis dan biomaterial seperti perancah dan hidrogel untuk penyembuhan luka dan pengobatan regeneratif. Gelatin yang berasal dari ikan merupakan alternatif gelatin sapi/babi dalam perangkat medis, menawarkan standar keamanan yang lebih tinggi. Material keramik bioaktif dari karang, kerang, dan bulu babi merupakan sumber sintesis hidroksiapatit untuk struktur tulang.

Bahan-bahan yang terinspirasi dari Biologi :

bahan komposit anorganik-organik yang sangat teratur dari enzim pembentuk silika spons (silikatin) dan cangkang biosilika berstruktur nano (frustula) dari diatom untuk produk teknologi tinggi seperti mikroelektronika.





- **Polisakarida**, termasuk algin, karagenan, agar, dan fukan sulfat (fukoidan, ulvan), digunakan sebagai **pengental, penstabil, dan agen pembentuk gel** dalam makanan. Beberapa juga menunjukkan aktivitas antitrombotik, antiinflamasi, antioksidan, antikanker, dan antidiabetes, atau berpotensi sebagai **serat pangan dan senyawa prebiotik**.
- **Pigmen** seperti karotenoid (misalnya, astaxanthin, fucoxanthin, β -karoten) dan klorofil. Pigmen-pigmen ini bertindak sebagai prekursor vitamin, antioksidan, dan agen anti-karsinogenik, serta digunakan sebagai pewarna makanan dan antioksidan. Proyek SMILE mengembangkan ekstrak mikroalga yang kaya fucoxanthin dan omega-3 untuk pengendalian berat badan dan fungsi kognitif. Proyek VOPSA 2.0 secara khusus bertujuan untuk memproduksi astaxanthin dan omega-3 dari mikroalga untuk suplemen makanan.
- **Kitin, kitosan, dan kitooligosakarida (COS)**, terutama diekstrak dari crustacea. Polimer-polimer ini dapat terurai secara hayati dengan sifat antibakteri, digunakan sebagai **pengawet makanan** dan agen antikolesterol karena kemampuannya menyerap lemak. Di Jepang, kitosan ditambahkan ke berbagai makanan sebagai bahan fungsional penurun kolesterol.
- **Mineral dan serat**. Proyek Blue Iodine II, misalnya, berfokus pada pengembangan produk berbasis alga yang kaya yodium untuk mengatasi kekurangan yodium.



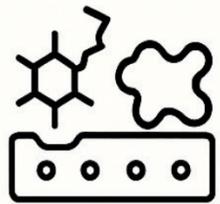


- **Asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) Omega-3** , seperti EPA, ARA, dan DHA, berasal dari ikan, mikroalga, dan thraustochytrids, yang telah terbukti memiliki sifat kardioprotektif, antioksidan, dan bermanfaat bagi perkembangan visual dan neurologis. Proyek LIFEOMEGA, misalnya, telah mengembangkan produk nutrisi kaya EPA untuk pasien kanker. Thraustochytrids dikenal sebagai sumber PUFA laut yang semakin penting dan ramah lingkungan, menawarkan alternatif pengganti minyak ikan karena masalah keberlanjutan, bau amis yang khas, dan stabilitas oksidatif yang buruk.
- **Vitamin, protein, peptida, dan asam amino** seperti taurin, banyak di antaranya penting bagi kesehatan manusia. Hidrolisat protein dari ikan, misalnya, dapat meningkatkan sistem kekebalan tubuh dan digunakan dalam industri makanan kesehatan dan nutrasetikal.
- **Polisakarida** , termasuk algin, karagenan, agar, dan fukan sulfat (fukoidan, ulvan), digunakan sebagai **pengental, penstabil, dan agen pembentuk gel** dalam makanan. Beberapa juga menunjukkan aktivitas antitrombotik, antiinflamasi, antioksidan, antikanker, dan antidiabetes, atau berpotensi sebagai **serat pangan dan senyawa prebiotik** .



Processing Technologies

Enzymatic Processes



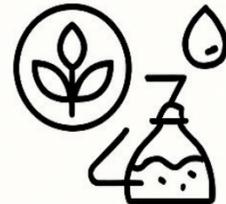
Marine enzymes for food processing' under extreme conditions (e.g. high temperatures, salinity, pH levels).
Proteases, lipases, amidases, chitinases, aiginate lyases

Cultivation Technologies (Cell Factories)



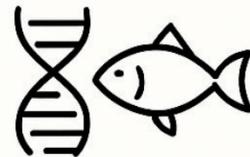
Controlled cultivation of macroalgae, microalgae, diatoms, cyanobacteria
Open systems (ponds) and closed systems (photobioreactors, fermenters)

Extraction Methods



Eco-friendly techniques for obtaining functional ingredients
Supercritical fluid extraction, subcritical water extraction
"milking" technique

Genetic and Metabolic Engineering



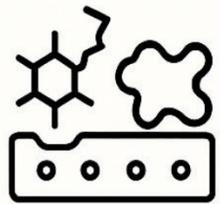
Improving product yields and traits in marine organisms
Optimized production (e.g., antioxidant carotenoids, omega,-3 fatty acids, fish meat quality)

- **Proses Enzimatik** : Enzim laut sangat penting dalam pengolahan makanan, menawarkan keuntungan karena aktivitas dan stabilitasnya dalam kondisi ekstrem seperti suhu tinggi, salinitas, dan berbagai tingkat pH. Enzim ini dapat secara efisien mengubah produk sampingan laut menjadi bahan fungsional, menawarkan pendekatan yang lebih berkelanjutan dan hemat biaya dibandingkan metode kimia tradisional. Contohnya antara lain protease, lipase, amidase, kitinase, dan alginat liase.
- **Teknologi Budidaya (Pabrik Sel)** : Makroalga, mikroalga, diatom, dan sianobakteri dibudidayakan dalam **sistem terbuka (kolam)** dan **sistem tertutup (fotobioreaktor atau fermentor)** . Metode-metode ini memungkinkan produksi biomassa dan senyawa bernilai tinggi yang terkendali, dengan keuntungan seperti pemanfaatan energi matahari, mitigasi polutan udara, dan pencapaian produktivitas serta kualitas biomassa yang lebih tinggi dalam lingkungan yang terkendali. **Budidaya heterotrofik dan miksotrofik** dalam fermentor dapat menawarkan proses yang lebih terkendali dan hemat biaya.



Processing Technologies

Enzymatic Processes



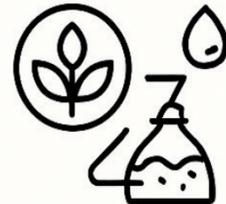
Marine enzymes for food processing' under extreme conditions (e.g. high temperatures, salinity, pH levels).
Proteases, lipases, amidases, chitinases, aiginate lyases

Cultivation Technologies (Cell Factories)



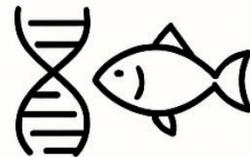
Controlled cultivation of macroalgae, microalgae, diatoms, cyanobacteria
Open systems (ponds) and closed systems (photobioreactors, fermenters)

Extraction Methods



Eco-friendly techniques for obtaining functional ingredients
Supercritical fluid extraction, subcritical water extraction
"milking" technique

Genetic and Metabolic Engineering



Improving product yields and traits in marine organisms
Optimized production (e.g., antioxidant carotenoids, omega,-3 fatty acids, fish meat quality)

- **Metode Ekstraksi** : Teknik ekstraksi canggih dan ramah lingkungan seperti **ekstraksi fluida superkritis (SFE) dan ekstraksi air subkritis (SWE)** digunakan untuk mendapatkan bahan-bahan fungsional, menawarkan selektivitas tinggi dan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional. Teknik "memerah susu" juga sedang dieksplorasi untuk ekstraksi metabolit regeneratif non-destruktif dari organisme laut.
- **Rekayasa Genetika dan Metabolisme** : Teknik-teknik yang berkembang pesat ini, terutama untuk mikroalga, digunakan untuk **meningkatkan hasil** dan karakteristik produk. Teknik ini memungkinkan manipulasi organisme laut yang terkendali untuk mengoptimalkan produksi senyawa-senyawa tertentu. Misalnya, rekayasa metabolik dapat meningkatkan kapasitas produksi karotenoid antioksidan. Teknologi DNA rekombinan juga digunakan untuk meningkatkan produktivitas suatu organisme atau memperbaiki sifat-sifat produk, seperti meningkatkan produksi asam lemak omega-3 atau meningkatkan kualitas daging ikan.



Alga (Makroalga dan Mikroalga) : Banyak digunakan untuk mengekstrak mineral, serat, dan metabolit sekunder seperti **lipid dan karotenoid** untuk suplemen makanan atau aditif nutrasetika, yang juga memiliki aplikasi kosmetik.

- **Karotenoid** (misalnya, astaxanthin, fucoxanthin, β -karoten, lutein) bertindak sebagai **prekursor vitamin, antioksidan, dan agen anti-karsinogenik**. Karotenoid digunakan sebagai **pewarna makanan dan antioksidan**, serta sedang dieksplorasi karena **aktivitas anti-inflamasi dan anti-penuaannya**, serta untuk mengurangi risiko penyakit seperti diabetes. Contoh spesifiknya meliputi:



- **Astaxanthin** dari *Haematococcus pluvialis* dianggap sebagai "antioksidan super" yang dapat diaplikasikan dalam nutrasetikal dan kosmetik manusia. Proyek VOPSA 2.0 secara khusus bertujuan untuk memproduksi astaxanthin dari mikroalga untuk suplemen makanan, dengan *Neoalgae* mengembangkan lini kosmetik, Alskin, yang mencakup krim wajah dengan ekstrak *Haematococcus pluvialis* yang kaya astaxanthin.
- **Fucoxanthin dan asam lemak omega-3** dari mikroalga, seperti yang terlihat dalam proyek SMILE, dikembangkan untuk produk nutrasetika yang juga mendukung fungsi kognitif dan pengendalian berat badan, yang menunjukkan manfaat kesehatan yang lebih luas yang berlaku untuk kesejahteraan dan penampilan.
- **β -karoten** dari *Dunaliella salina* adalah pigmen lain yang diproduksi secara komersial dari mikroalga.



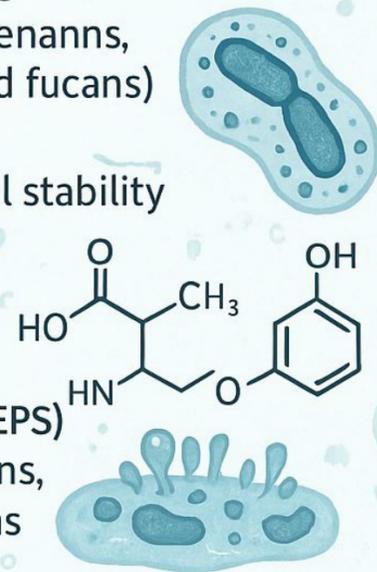
Potensi dalam Industri Kosmetik

Polysaccharides

(e.g., alginates, carrageenans, fucoidans, sulphated fucans)

- Skin moisture
- Increase an mechanical stability for packaging, films prosthetics, and food stabilizers

Exopolysaccharides (EPS) from microorganisms, which form microflocs

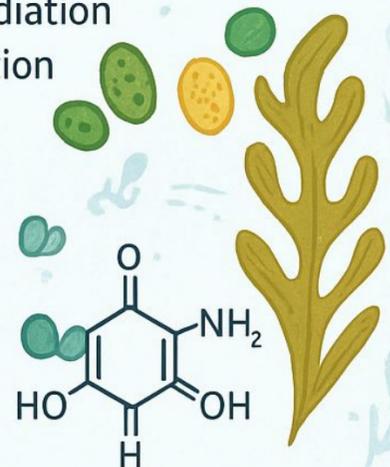


Chlorophylls and phycobiliproteins microalgal pigments with cosmetic potential

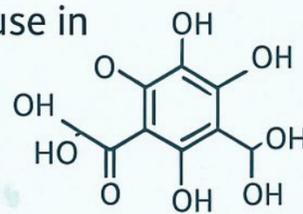


Mycosporine-like amino acids (MAAs)

Produced by marine organisms (cyanobacteria, micro- and macroalgae) under high UV radiation
Absorb UV radiation
anti-aging agents



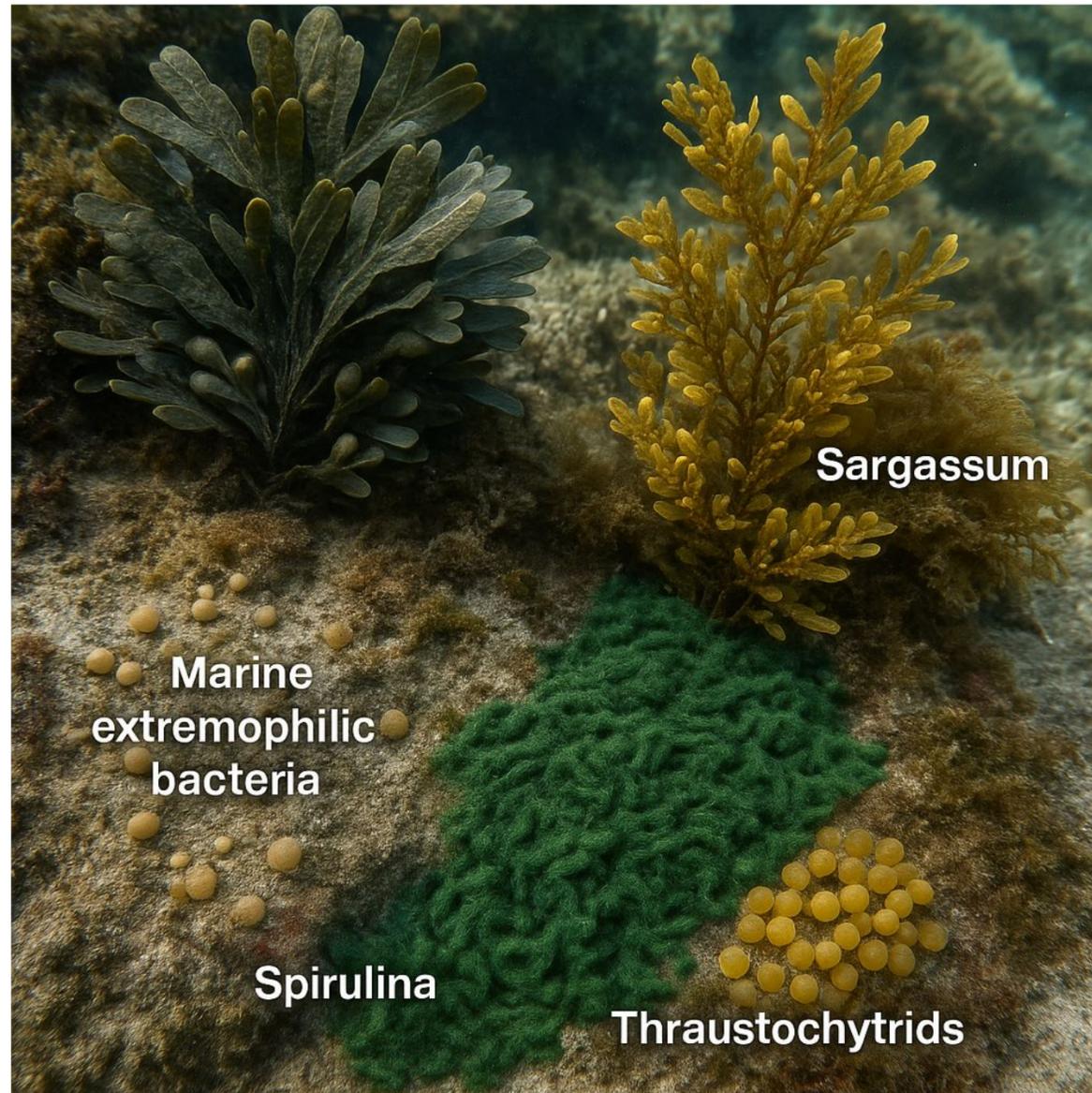
Phlorotannins from brown seaweeds also have potential use in



- **Polisakarida** (misalnya, alginat, karagenan, fukoidan, fukan sulfat) digunakan sebagai **pengental, penstabil, dan agen pembentuk gel**. Beberapa juga menunjukkan **aktivitas antikoagulan, antibakteri, antivirus, dan antijamur**. Eksopolisakarida (EPS) dari mikroorganisme, yang merupakan komponen utama biofilm, dapat **meningkatkan kelembapan kulit** dan memberikan stabilitas mekanis untuk bahan-bahan seperti kemasan, film, prostetik, dan penstabil makanan.
- **Asam amino mirip mikosporin (MAA)**, yang diproduksi oleh organisme laut (cyanobacteria, mikro, dan makroalga) di bawah tekanan UV tinggi, menyerap radiasi UV dan dianggap sebagai **agen fotoprotektif dan anti-penuaan**.
- **Klorofil dan fikobiliprotein** juga merupakan pigmen mikroalga dengan potensi kosmetik.
- **Florotanin** dari rumput laut coklat juga memiliki potensi penggunaan dalam kosmetik.



Potensi dalam Industri Kosmetik



- Rumput laut invasif, seperti spesies *Fucus* dan *Sargassum* , dapat dimanfaatkan untuk produk perawatan kulit, juga mengurangi dampak buruk pada keanekaragaman hayati setempat.
- **Mikroorganisme Laut (Bakteri, Jamur, Thraustochytrids, Cyanobacteria)** : Ini semakin diakui sebagai sumber berbagai metabolit sekunder untuk kosmetik.
 - Bakteri ekstremofil laut, yang beradaptasi dengan berbagai lingkungan laut ekstrem, menawarkan sifat-sifat yang unik.
 - Jamur laut merupakan sumber metabolit aktif secara farmakologis yang menjanjikan.
 - Cyanobacteria, seperti *Arthrospira* (Spirulina), menghasilkan beragam metabolit sekunder bioaktif dengan **aktivitas antimikroba, antiinflamasi, antioksidan, antikoagulan, antikanker, antiprotozoa, dan antivirus** sehingga cocok untuk aplikasi medis, makanan, dan kosmetik.

Potensi dalam Industri Kosmetik



- **Hewan Laut dan Produk Sampingannya :**
 - **Ikan** merupakan sumber **asam lemak tak jenuh ganda** (PUFA) omega-3 dengan sifat kardioprotektif dan antioksidan, juga digunakan dalam kosmetik.
 - **Kolagen dan gelatin** yang berasal dari ubur-ubur laut dan produk sampingan ikan merupakan bahan fungsional yang sangat baik untuk industri kosmetik. Jellagen PTY Ltd, misalnya, memasarkan kolagen ubur-ubur untuk peralatan medis dan biomaterial.
 - **Kitin** dari krustasea digunakan sebagai bahan aktif dalam kosmetik.
 - **Peptida bioaktif** dari limbah pengolahan ikan dan kerang dapat digunakan dalam nutrasetikal dan farmasi. Peptida yang berasal dari *Chlorella* telah menunjukkan efek perlindungan terhadap kerusakan akibat sinar UV pada fibroblas kulit manusia.
 - **Enzim dan peptida** dari sumber laut dapat bertindak sebagai agen anti-penuaan dengan melindungi simpanan kolagen.
- **Lamun:** *Zostera noltii* dan *Z. marina* beach wrack mengandung **asam rosmarinat**, suatu senyawa fenolik yang memiliki nilai ekonomis bagi industri kosmetik. Detrital daun *Cymodocea nodosa* mengandung **asam chicoric dalam jumlah tinggi**, suatu senyawa fenolik dengan aplikasi terapeutik dan nilai tinggi di pasar nutrasetikal.



Manfaat Produk, Formulasi, dan Contoh Produk Nyata

Examples of cosmeceuticals utilizing algal extracts

BIOTHERM	LA MER	ELEMIS
OceanBasis®	GUAM algae	la prairie
DERMOCHLORELLA DG®	ALGURON ACID®	
EYEDINE	BRIGHLETTE®	SEACODE®
Fungal extracts		Extremophilic marine microorganisms
HYADISINE®	ANTARTICINE®	HYAFINI®
Marine polymers		

• Manfaat dan Formulasi Produk

- Senyawa yang berasal dari laut menyediakan bahan aktif dengan **sifat antioksidan, pelembab, antiinflamasi, dan fotoprotektif** untuk krim dan losion.
- Senyawa tersebut berkontribusi terhadap **efek anti-kerut dan anti-penuaan**, seringkali dengan melindungi kolagen.
- Banyak produk perawatan kulit laut di pasaran bukanlah senyawa murni melainkan **ekstrak yang diolah atau campuran yang diperkaya**.

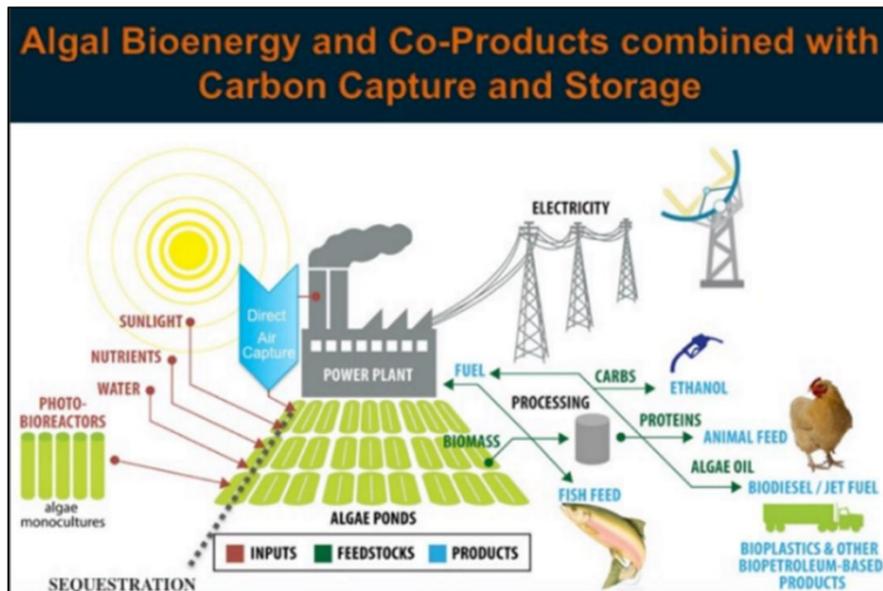
- Contoh kosmetik yang menggunakan ekstrak alga antara lain Biotherm®, La Mer®, Elemis®, OceanBasis®, Guam algae®, dan La Prairie®. Ekstrak mikroalga ditemukan dalam Dermochlorella DG®, XCELL-30®, Alguronic Acid®, dan Alguard®. Ekstrak jamur digunakan dalam Eyedeline dan Brighlette dari Lipotec.
- Polimer laut, seperti SeaCode® dari *Pseudoalteromonas sp.*, digunakan untuk menenangkan, mengurangi iritasi, dan memberikan sifat menghidrasi dan anti-kerut.
- Mikroorganisme laut ekstremofilik menghasilkan bahan kosmetik ampuh seperti Hyadisine®, Antarticine®, dan Hyafini®.



Biofuel and Energi

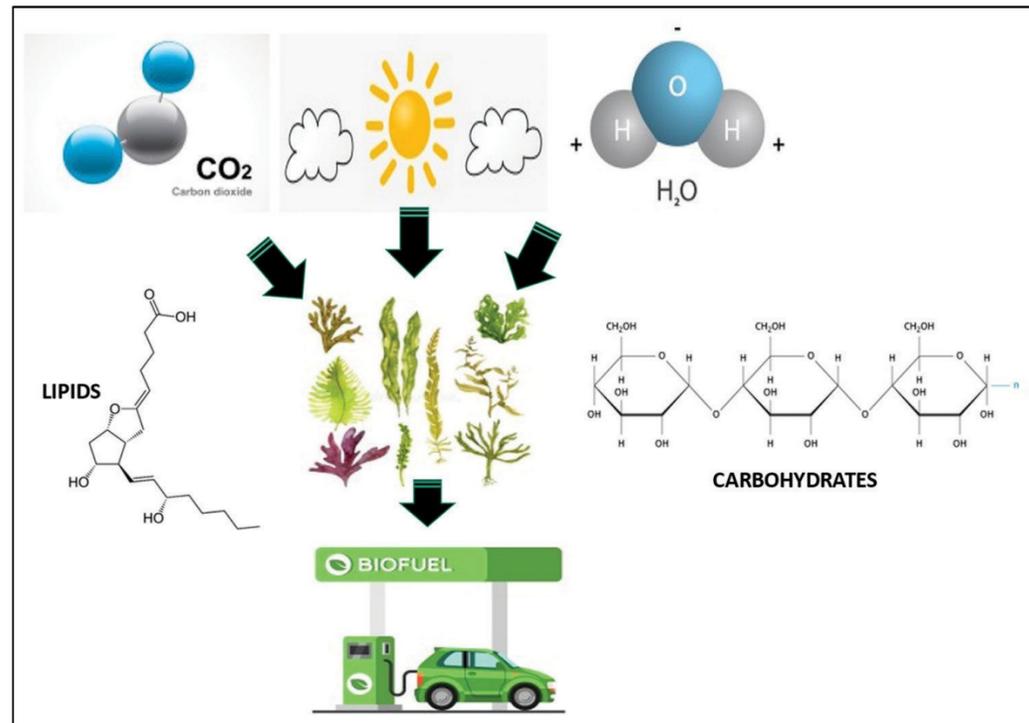
Sumber Biofuel dan Pembawa Energi dari Organisme Laut:

- **Alga (Makroalga dan Mikroalga):** Ini sangat menjanjikan karena kemampuannya menghasilkan sejumlah besar molekul bioaktif dan produktivitasnya yang tinggi.
 - **Mikroalga** dianggap sebagai penghasil penting senyawa bioaktif tinggi dan dapat meningkatkan profil nutrisi pangan karena kaya akan asam lemak tak jenuh ganda (PUFA) dan pigmen. Mikroalga merupakan sumber biofuel yang menjanjikan karena komposisi kimia dan kelimpahannya di dunia, dengan beberapa spesies mampu menghasilkan energi per ton yang jauh lebih banyak daripada tanaman konvensional. Mikroalga dapat tumbuh di fotobioreaktor atau kolam terbuka, memanfaatkan energi matahari dan gas rumah kaca, yang juga membantu mengurangi polusi udara.
 - **Makroalga (rumput laut)** dapat diubah menjadi sumber energi seperti metana (biogas) atau bioetanol melalui fermentasi. Mereka juga menawarkan keuntungan karena tidak bersaing dengan tanaman pangan untuk mendapatkan sumber daya lahan atau air tawar. Spesies invasif seperti *Fucus* dan *Sargassum* dapat dimanfaatkan untuk energi.
- **Thraustochytrids:** Mikroorganisme oleaginous ini merupakan sumber PUFA laut yang semakin penting, terutama DHA, dan juga berpotensi menghasilkan squalene dan karotenoid, yang merupakan senyawa penting secara komersial dengan potensi pasar yang semakin meningkat. Mereka juga dikenal menghasilkan asam lemak jenuh, yang berfungsi sebagai sumber terbarukan untuk biofuel seperti biodiesel.
- **Mikroorganisme Laut (Bakteri, Jamur, Sianobakteri):** Sianobakteri, seperti *Arthrospira* (Spirulina), memiliki potensi untuk produksi biohidrogen. Bakteri laut telah dieksplorasi untuk menghasilkan biofuel seperti bioetanol.



Sumber: Modified for educational purposes by C.H. Greene from original figure produced by Cellana, LLC. Accessed through EESI





(Olanrewaju, et. Al. 2024)

Jenis-jenis Biofuel dan Aplikasi Energi:

- **Biodiesel:** Mikroalga, dengan kandungan lipidnya yang tinggi, dievaluasi secara luas untuk produksi biodiesel. Upaya yang dilakukan meliputi optimalisasi kondisi pertumbuhan dan modifikasi genetik spesies seperti *Nannochloropsis* dan *Phaeodactylum tricornutum*.
- **Bioetanol:** Makroalga dan mikroalga dapat difermentasi untuk menghasilkan bioetanol. Pemanfaatan biomassa laut yang tersisa dan melimpah untuk produksi bioetanol dan biogas didorong untuk menghindari persaingan dengan industri biopolimer.
- **Biogas (Metana):** Rumput laut dapat difermentasi menjadi metana. Produksi biometana yang mudah terbakar dan pembuangan biomassa laut yang tidak diinginkan secara bersamaan merupakan konsep pengelolaan limbah yang sinergis dan bermanfaat bagi lingkungan.
- **Biohidrogen:** Penelitian dasar mengembangkan produksi langsung hidrogen (H₂) oleh mikroorganisme laut.
- **Sistem Energi Lainnya:** Rumput laut dapat digunakan dalam sistem energi terbarukan sebagai alternatif elektrolit padat dalam sel fotovoltaik peka warna, menyediakan alternatif berbiaya rendah dan ramah lingkungan untuk kompleks logam yang mahal.



Teknologi dan Proses Produksi:

- **Pabrik Sel:** Budidaya organisme laut dalam "pabrik sel" (makroalga, mikroalga, diatom, cyanobacteria) dapat dilakukan dalam sistem terbuka (kolam) atau sistem tertutup/buatan (bioreaktor).
 - **Kolam Terbuka:** Menawarkan biaya lebih rendah dan kapasitas produksi tinggi, memanfaatkan energi matahari untuk produksi biomassa. *Dunaliella salina* untuk β -karoten adalah contoh budidaya kolam terbuka yang sukses.
 - **Fotobioreaktor (PBR):** Memberikan kontrol parameter pertumbuhan yang lebih baik (nutrisi, suhu, pH, CO₂, O₂), mencegah kontaminasi, dan memungkinkan konsentrasi sel serta produktivitas volumetrik yang lebih tinggi. PBR tersedia dalam berbagai desain (datar, tabung, heliks). Meskipun menawarkan produktivitas yang lebih tinggi, umumnya lebih mahal dan boros energi dibandingkan sistem terbuka.
- **Budidaya Stres (Proses Pemerahan):** Teknik seperti budidaya stres bertujuan untuk meningkatkan produksi metabolit sekunder dengan menghilangkannya secara terus-menerus sambil menjaga kultur tetap aktif.
- **Budidaya Heterotrofik dan Mixotrofik:** Beberapa strain alga dan cyanobacteria dapat tumbuh secara heterotrofik dalam fermentor menggunakan sumber karbon seperti glukosa, yang dapat lebih murah dan lebih terkendali daripada budidaya fotoautotrofik.
- **Teknologi Ekstraksi:** Proses bersih seperti ekstraksi air, ekstraksi fluida superkritis (SFE), dan ekstraksi air subkritis (SWE) diteliti untuk mengekstrak bahan fungsional seperti lipid dan fenol. SFE menggunakan karbon dioksida dianggap sebagai metode yang ramah lingkungan, tidak beracun, murah, dan tidak mudah terbakar untuk pengolahan asam lemak omega-3.





- **Konsep Biorefineri:** Pendekatan ini mengintegrasikan proses konversi biomassa untuk menghasilkan bahan kimia, bahan bakar, listrik, dan panas bernilai tambah dari berbagai jenis biomassa limbah. Biorefineri kelautan bertujuan untuk menghasilkan bahan aktif biologis bernilai tinggi dari biomaterial limbah laut. Pendekatan kaskade memanfaatkan semua senyawa bioaktif, dengan sisa biologisnya dimanfaatkan sebagai pakan atau bioenergi.
- **Proses Enzimatik:** Enzim laut sangat penting bagi rantai nilai biorefineri, terutama dalam pra-perlakuan biomassa. Enzim ini dapat memfasilitasi konversi minyak mentah menjadi biodiesel, dan meningkatkan efisiensi ekstraksi senyawa bioaktif spesifik dari rumput laut.

Keunggulan Biofuel Laut:

- **Produktivitas Tinggi:** Mikroalga memiliki potensi produktivitas sepuluh kali lipat lebih besar daripada tanaman pertanian.
- **Penggunaan Lahan Non-Subur:** Produksi dapat dilakukan di lahan non-subur, menghindari persaingan dengan produksi pangan.
- **Pemanfaatan Limbah:** Alga dapat memanfaatkan air limbah sebagai sumber nutrisi dan/atau



Enzim dalam Proses Industri

- **Mikroorganisme Laut:** Bakteri, fungi, dan archaea merupakan sumber yang sangat berharga karena kemampuan adaptasinya terhadap kondisi ekstrem dan kemampuannya menghasilkan beragam metabolit sekunder dan enzim. Lebih dari 120 genom arkea hipertermofilik, misalnya, telah diurutkan, mengungkap galur-galur menarik seperti *Pyrococcus*, *Thermococcus*, dan *Thermotoga* yang menghasilkan ekstremozim yang kuat. Fungi laut, khususnya, merupakan produsen enzim yang produktif dan beragam, yang menyumbang persentase signifikan dari produk alami yang baru dideskripsikan.
- **Alga (Makroalga dan Mikroalga):** Meskipun lebih dikenal sebagai biofuel, organisme ini juga mengandung enzim, dan proses yang melibatkan biomasanya sering kali memanfaatkan enzim untuk pemecahan dan konversi.
- **Thraustochytrids:** Mikroorganisme oleaginous ini dikenal memiliki lipase ekstraseluler baru dan enzim hidrolitik lainnya seperti agarase, amilase, pektinase, kitinase, dan karagenase, yang cocok untuk berbagai aplikasi industri.
- **Invertebrata Laut:** Enzim juga diekstraksi dari invertebrata laut, meskipun banyak penelitian berfokus pada mikroorganisme terkait.



Aplikasi Industri Enzim Laut

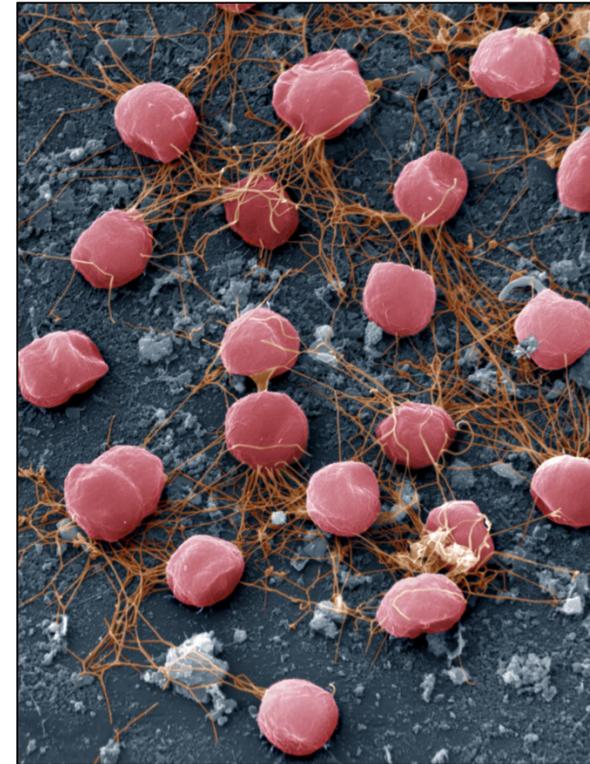
- **Biorefinery Value-Chain (Rantai Nilai Biorefineri):** Ini adalah area krusial, di mana enzim laut digunakan dalam **pra-perlakuan biomassa** (misalnya, dari akuakultur seperti alga dan rumput laut) untuk menghasilkan bahan baku berbasis karbon terbarukan, dan juga untuk memanipulasi minyak baku untuk **produksi biodiesel**.
 - Contohnya termasuk **selulase** dan **enzim lain yang aktif terhadap karbohidrat** (seperti hemiselulase, pektinase, protease, dan amilase) dari mikroba laut, yang dieksplorasi untuk sakarifikasi biomassa rumput laut. **Lipase** juga dievaluasi secara luas untuk mengubah berbagai minyak mentah menjadi biodiesel.
 - Aliran limbah dari pembuatan cumi-cumi atau pengolahan kerang dapat dimanfaatkan melalui hidrolisis enzimatik untuk menghasilkan suplemen nutrisi untuk budidaya bakteri, atau untuk produksi bioetanol dan biogas.
- **Industri Makanan:** Enzim laut digunakan dalam pengolahan makanan, menawarkan keuntungan dibandingkan enzim tradisional karena aktivitasnya dalam kondisi yang tidak biasa.
 - Mereka dimanfaatkan untuk produksi **bahan fungsional** seperti peptida dengan sifat antihipertensi dan imunomodulator dari protein ikan.
 - **Enzim yang aktif terhadap dingin** sangat berguna dalam industri makanan dan minuman untuk memproses produk yang sensitif terhadap panas, menjaga kualitas nutrisi dan organoleptiknya.
 - Pendekatan enzimatik juga dieksplorasi untuk **penghilangan bau minyak ikan** dan untuk **produksi kitin dan kitosan** dari limbah kerang.



Aplikasi Industri Enzim Laut

- **Fine Chemistry dan Teknik Laboratorium:** Enzim laut memungkinkan **ekstraksi atau modifikasi** molekul laut yang kompleks secara selektif dan efisien, berkontribusi pada proses berkelanjutan dalam kimia halus.
 - Enzim laut digunakan untuk **sintesis produk baru** dan untuk **meningkatkan efisiensi ekstraksi** senyawa bioaktif spesifik dari rumput laut.
 - Contoh spesifiknya meliputi produksi **glukosa dari selada laut** menggunakan enzim kelinci laut, dan sintesis asimetris D-metil laktat oleh esterase mikroba laut.
 - **Polimerase Pfu** dari *Pyrococcus furiosus*, mikroorganisme laut ekstremofilik, adalah contoh terkenal yang digunakan dalam PCR untuk kesetiaan replikasi tinggi dalam aplikasi laboratorium.
- **Bioremediasi dan Aplikasi Lingkungan:** Enzim laut memainkan peran penting dalam **bioremediasi** dengan mengubah zat beracun menjadi senyawa yang kurang berbahaya, mengintegrasikannya ke dalam siklus biogeokimia.
 - Mikroorganisme mensintesis enzim yang dapat **mendegradasi plastik** (lipase, alkana hidroksilase, lakase) dan terlibat dalam **penghilangan warna limbah industri**.
 - Jamur laut dan lakasenya secara khusus digunakan dalam industri tekstil untuk mengolah limbah asin.
 - **Karbonat anhidrase** dari ekstremofil laut sedang diselidiki untuk **penyerapan CO₂** dan sebagai **biomarker** untuk pemantauan lingkungan.

Pyrococcus furiosus



(Kengen S.W.M. 2017)



Teknologi Produksi Enzim Laut

- **Pabrik Sel & Bioreaktor:** Budidaya organisme laut dalam "pabrik sel" (makroalga, mikroalga, bakteri, jamur) dilakukan di kolam terbuka atau **fotobioreaktor terkendali (PBR)** dan fermentor. Meskipun PBR menawarkan kendali yang lebih baik atas parameter pertumbuhan dan produktivitas volumetrik yang lebih tinggi, umumnya lebih mahal dan membutuhkan energi yang lebih besar.
- **Metagenomik:** Pendekatan genetik ini memungkinkan studi campuran mikroba kompleks dari lingkungan laut, mengidentifikasi gen yang terlibat dalam biosintesis senyawa bioaktif, yang mengarah pada **penemuan enzim baru** bahkan dari mikroorganisme yang belum dapat dikultur. Proyek INMARE, misalnya, menghasilkan koleksi enzim genomik dan metagenomik yang besar untuk operasi industri.
- **Rekayasa Genetika dan Metabolisme:** Teknik seperti teknologi DNA rekombinan dan rekayasa metabolisme digunakan untuk **meningkatkan produktivitas** suatu organisme atau memperbaiki hasil dan karakteristik suatu produk dengan mengoptimalkan jalur metabolisme dan mengekspresikan enzim pada inang yang sesuai.
- **Teknologi Bio-proses: Hidrolisis yang dimediasi enzim** merupakan teknologi bioproses penting yang memberikan nilai tambah pada produk sampingan laut. Metode seperti **bioreaktor membran** yang dilengkapi membran ultrafiltrasi digunakan untuk pemulihan bahan fungsional yang efisien.
- **Teknologi Ekstraksi:** Teknologi baru yang ramah lingkungan, seperti **supercritical fluid extraction (SFE)** dan **subcritical water extraction (SWE)**, diteliti untuk mengekstraksi bahan-bahan fungsional, termasuk enzim, menggunakan pelarut non-toksik. Metode **Enzyme-assisted extraction (EAE)** sedang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi waktu ekstraksi. "**Proses pemerahan (milking process)**" adalah teknik ekstraksi regeneratif non-destruktif yang memungkinkan penghilangan metabolit secara terus-menerus sekaligus menjaga kultur tetap aktif, sehingga mengurangi biaya yang terkait dengan pemanenan dan disrupti sel.



Bioremediasi

Degradasi Polutan

- **Hidrokarbon dan Aromatik:** Bakteri laut dari filum seperti Proteobacteria, Actinobacteria, Cyanobacteria, Bacteroidetes, dan Firmicutes digunakan untuk mendegradasi polutan aromatik, seperti hidrokarbon aromatik polisiklik/*polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs), dalam sedimen yang tercemar minyak dan tumpahan minyak bumi. Taksa bakteri pendegradasi hidrokarbon spesifik telah ditemukan pada sampah plastik laut, menunjukkan potensi mereka dalam degradasi plastik.
- **Plastik:** Mikroorganisme mensintesis enzim seperti **lipase, alkana hidroksilase, dan lakase** yang dapat merusak plastik.
- **Limbah Industri:** Jamur laut yang menghasilkan enzim pendegradasi lignin digunakan untuk **dekolorisasi limbah berwarna pekat** dari industri kertas, pabrik pulp, tekstil, dan pewarna. Jamur ini juga menunjukkan kemampuan pendegradasi minyak yang kuat.
- **Limbah Asin:** Jamur laut dan laccases secara khusus digunakan dalam industri tekstil untuk mengolah limbah asin.
- **Polutan Lainnya:** Mikroalga telah menunjukkan potensi dalam mendegradasi kontaminan baru seperti produk farmasi dan perawatan pribadi.
- **Mekanisme:** Kemampuan metabolisme organisme alami memungkinkan mereka mengubah zat beracun menjadi senyawa yang kurang berbahaya. Penelitian telah mengeksplorasi degradasi anaerobik hidrokarbon kompleks oleh komunitas bakteri sedimen laut dan reduksi enzimatis kromat oleh bakteri pereduksi sulfat.



Bioremediasi

Penghapusan Logam Berat

- **Bioakumulasi:** Baik mikroalga maupun makroalga dapat **mengakumulasi logam berat** seperti arsenik, kadmium, merkuri, dan timbal secara hayati, serta menghilangkannya dari perairan di sekitarnya.
- **Spesies Mikroalga:** Genera seperti *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Tetraselmis* , dan *Arthrospira* dilaporkan memiliki kapasitas penyerapan logam berat beracun yang tinggi.
- **Mekanisme:** Mikroalga menyerap logam berat melalui **adsorpsi** (penyerapan permukaan yang cepat oleh polisakarida dinding sel dan gugus fungsi) dan **absorpsi** (proses yang lebih lambat dan membutuhkan energi ke bagian dalam sel). Mereka juga mensintesis peptida pengikat logam, seperti metallothionein yang kaya sistein, untuk menetralkan efek toksik.



Bioremediasi

Penghapusan Nutrisi dan Pengolahan Limbah

- **Pengolahan Air Limbah:** Mikroalga, rumput laut, dan kerang dapat menghilangkan nutrisi dari air limbah industri dan akuakultur. Misalnya, budidaya mikroalga pada kotoran babi yang diencerkan dapat digunakan untuk produksi listrik atau sebagai pakan ternak.
- **Biofilter:** Kerang bertindak sebagai filter alami untuk mengekstrak mikroalga dari air laut yang digunakan sebagai air pendingin atau di dekat tambak ikan. Biofilm juga digunakan sebagai **biofilter dalam sistem akuakultur resirkulasi** untuk mengubah amonia menjadi nitrat, memulihkan kondisi sehat bagi ikan dan udang budidaya.
- **Pemanfaatan Produk Sampingan:** Aliran limbah dari pengolahan makanan laut (misalnya, pembuatan cumi-cumi, pengolahan kerang) dapat dimanfaatkan melalui hidrolisis enzimatis untuk menghasilkan suplemen nutrisi untuk budidaya bakteri, atau untuk produksi bioetanol dan biogas.



Bioremediasi

Mitigasi Perubahan Iklim

- **Pemanfaatan Produk Sampingan:** Aliran limbah dari pengolahan makanan laut (misalnya, pembuatan cumi-cumi, pengolahan kerang) dapat dimanfaatkan melalui hidrolisis enzimatis untuk menghasilkan suplemen nutrisi untuk budidaya bakteri, atau untuk produksi bioetanol dan biogas.
- **Penangkapan Karbon:** Mikro dan makroalga berkontribusi secara signifikan terhadap **penangkapan karbon** dengan menyerap karbon dari atmosfer, dengan sebagian besar biomassa makroalga diangkut ke laut dalam dan sedimen untuk penyerapan jangka panjang.
- **Karbonik Anhidrase:** Enzim dari ekstremofil laut, seperti karbonik anhidrase, diteliti untuk **penyerapan CO₂** karena perannya dalam penangkapan CO₂ biomimetik.
- **Pengurangan Emisi Metana:** Menambahkan rumput laut merah *Asparagopsis taxiformis* sebagai amandemen pakan ternak telah terbukti mengurangi emisi metana enterik hingga 98%.

Antifouling: Organisme laut dan senyawanya, terutama dari spons dan bakteri tertentu, dieksplorasi karena aktivitas antifoulingnya untuk mencegah biofouling pada permukaan laut.



Pemantauan Lingkungan

Bioteknologi kelautan juga berkontribusi terhadap pemantauan lingkungan melalui penggunaan **biomarker** dan **biosensor** :

- **Bioindikator:** Organisme laut seperti kerang (*Mytilus edulis*) digunakan sebagai **bioindikator** untuk memantau polusi logam berat dan menilai paparan terhadap polutan lingkungan.
- **Biomarker Enzimatik:**
 - **Enzim Biotransformasi:** Studi menyelidiki enzim biotransformasi (fase I dan II) dan stress protein (misalnya, heat shock protein-70) sebagai biomarker. Misalnya, pola fosforilasi MAPK pada kerang dapat menunjukkan paparan berbagai polutan.
 - **Enzim Antioksidan:** Perubahan aktivitas enzim antioksidan (misalnya, katalase, superoksida dismutase, glutathione peroksidase) pada organisme seperti kerang dan ikan dinilai sebagai respons terhadap kontaminasi petrokimia atau paparan logam.
 - **Karbonat Anhidrase:** Metaloenzim ini juga dibahas karena potensinya sebagai biomarker baru dalam pemantauan lingkungan dan pengembangan biosensor untuk logam.
- **Studi Transkriptomik:** Perbedaan transkriptomik pada hati ikan yang terpapar zat penghambat api diselidiki untuk menilai respons molekuler terhadap polusi.
- **Studi Bioinformatika:** Pendekatan bioinformatika digunakan untuk mempelajari efek polusi logam pada enzim organisme air laut, memberikan wawasan tentang peran fisiologis.
- **Biosensor:** Bioteknologi kelautan mendukung pengembangan biosensor untuk mengukur perubahan kondisi lingkungan, termasuk ekosistem biologis dan mikroba.





Kosmetik: Produk Anti Penuaan dan Perawatan Kulit

Contoh : ALGOTHERM (Prancis) – Blue Biotechnology

- **Sumber** : Alga laut dan rumput laut
- **Produk** : Krim dan serum anti penuaan yang diperkaya dengan kolagen laut dan polisakarida
- **Nilai Tambah** : Bahan aktif berbasis laut menyediakan antioksidan dan hidrasi alami dengan metode pemanenan berkelanjutan. Produk-produk ini memenuhi permintaan yang terus meningkat akan solusi perawatan kulit yang alami, efektif, dan ramah lingkungan.

Makanan Fungsional dan Nutrasetikal

Contoh : Astaxanthin dari *Haematococcus pluvialis* atau mikroalga laut

- **Sumber** : Mikroalga laut yang dibudidayakan
- **Produk** : Suplemen nutrisi dengan sifat antioksidan dan anti-inflamasi
- **Nilai Tambah** : Senyawa alami yang berasal dari laut dengan nilai kesehatan tinggi, dipasarkan untuk mendukung sistem kardiovaskular dan kekebalan tubuh.



Farmasi: Agen Antivirus dan Analgesik

Contoh : Ziconotide (Prialt®) oleh Elan Pharmaceuticals

- **Sumber** : Bisa siput kerucut (*Conus magus*)
- **Produk** : Analgesik non-opioid untuk nyeri kronis yang parah
- **Nilai Tambah** : Menawarkan alternatif bagi opioid tradisional, dengan spesifisitas tinggi dan risiko kecanduan yang berkurang, menampilkan organisme laut sebagai sumber senyawa obat baru.



Bahan Biomedis: Kolagen dan Kitosan

Contoh : Pembalut luka yang berasal dari laut

- **Sumber** : Kulit ikan, ubur-ubur, dan cangkang krustasea
- **Produk** : Bahan penyembuhan luka biokompatibel dan perancah untuk rekayasa jaringan
- **Nilai Tambah** : Kolagen laut dan kitosan dapat terurai secara hayati, meningkatkan penyembuhan, dan berfungsi sebagai alternatif berkelanjutan untuk biomaterial sintetis.

- **Contoh** : *Biomaterial dari Kitosan yang dikembangkan oleh peneliti Indonesia (misalnya IPB University, UI)*
- **Sumber** : Cangkang udang dan kepiting (hasil samping industri makanan laut)
- **Produk** : Pembalut luka berbasis kitosan, film penghantar obat, dan lapisan antimikroba
- **Nilai Tambah** : Mengubah limbah dari pengolahan makanan laut menjadi produk biomedis bernilai tinggi dengan aplikasi di klinik dan rumah sakit.

Industri Makanan: Enzim Laut untuk Pengolahan

Contoh : Protease dan lipase dari bakteri laut dalam

- **Sumber** : Mikroorganisme laut
- **Produk** : Digunakan dalam hidrolisis protein dalam pengolahan makanan (misalnya, saus ikan, susu)
- **Nilai Tambah** : Peningkatan efisiensi dalam kondisi pemrosesan ekstrem (suhu, salinitas, pH), menawarkan alternatif yang hemat biaya dan berkelanjutan untuk proses kimia.



Bioteknologi Industri: Bioplastik dan Biofuel

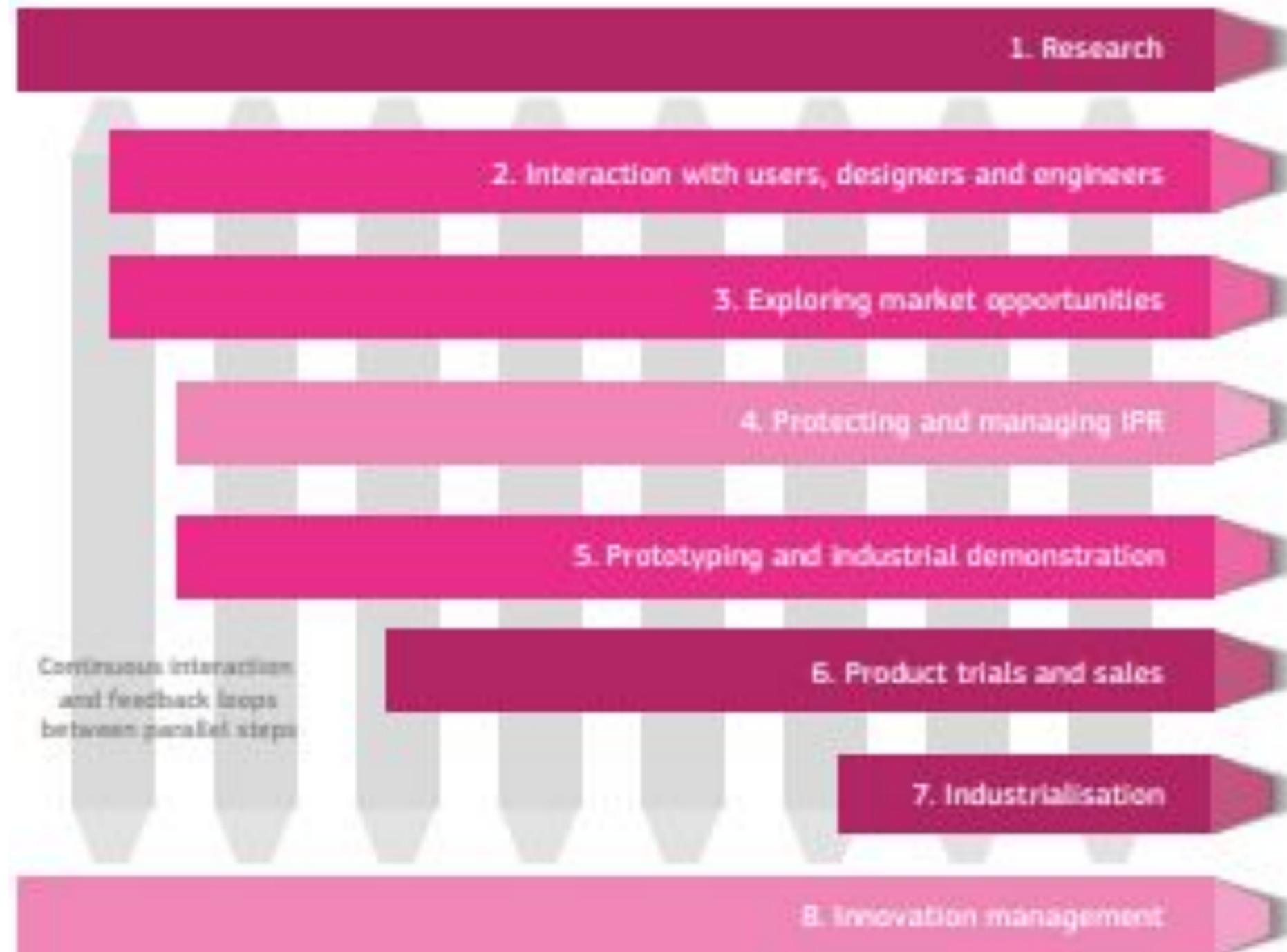
Contoh : Produksi PHA

(polihidroksialkanoat) oleh bakteri laut

- **Sumber** : Mikroorganisme laut
- **Produk** : Plastik yang dapat terurai secara hayati
- **Nilai Tambah** : Alternatif ramah lingkungan untuk plastik berbasis minyak bumi, dengan potensi untuk ditingkatkan menggunakan biomassa laut atau produk sampingannya.



Penelitian Translasional



Bibliografi

Wijffels, R. H. Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology. *Trends Biotechnol* **26**, 26–31 (2008).

Rotter, A. *et al.* The Essentials of Marine Biotechnology. *Frontiers in Marine Science* vol. 8 Preprint at <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.629629> (2021).

Part 3 : Innovation Management for Practitioners.

Daniotti, S. & Re, I. Marine biotechnology: Challenges and development market trends for the enhancement of biotic resources in industrial pharmaceutical and food applications. a statistical analysis of scientific literature and business models. *Mar Drugs* **19**, (2021).

Trincone, A. Enzymatic processes in marine biotechnology. *Marine Drugs* vol. 15 Preprint at <https://doi.org/10.3390/md15040093> (2017).

Freitas, A. C., Rodrigues, D., Rocha-Santos, T. A. P., Gomes, A. M. P. & Duarte, A. C. Marine biotechnology advances towards applications in new functional foods. *Biotechnology Advances* vol. 30 1506–1515 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.03.006> (2012).

Ritchie, R. J., Guy, K. & Philp, J. C. Policy to support marine biotechnology-based solutions to global challenges. *Trends in Biotechnology* vol. 31 128–131 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.01.009> (2013).

Thompson, C. C., Kruger, R. H. & Thompson, F. L. Unlocking Marine Biotechnology in the Developing World. *Trends in Biotechnology* vol. 35 1119–1121 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.08.005> (2017).

Luiten, E. E. M. *et al.* Realizing the promises of marine biotechnology. in *Biomolecular Engineering* vol. 20 429–439 (Elsevier, 2003).



TERIMA KASIH



sustainablue@sci.ui.ac.id



**SustainaBlue HEIs in Malaysia
and Indonesia**



**Co-funded by
the European Union**

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Project: 101129136 — SustainaBlue — ERASMUS-EDU-2023-CBHE

