



Pembangunan Produk Tambah Nilai dalam Bioteknologi Marin

Dibiayai oleh Kesatuan Eropah. Walau bagaimanapun, pandangan dan pendapat yang dinyatakan adalah pandangan pengarang sahaja dan tidak semestinya mencerminkan pandangan Kesatuan Eropah atau Agensi Eksekutif Pendidikan dan Kebudayaan Eropah (EACEA). Kesatuan Eropah mahupun EACEA tidak boleh dipertanggungjawabkan ke atas mereka.

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



Co-funded by
the European Union



RAKAN KONGSI PROJEK

Malaysia



Indonesia



Greece

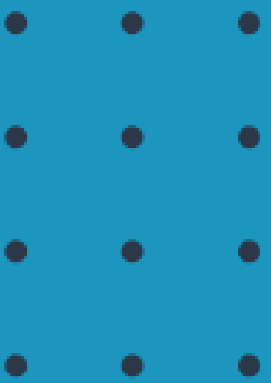


Cyprus



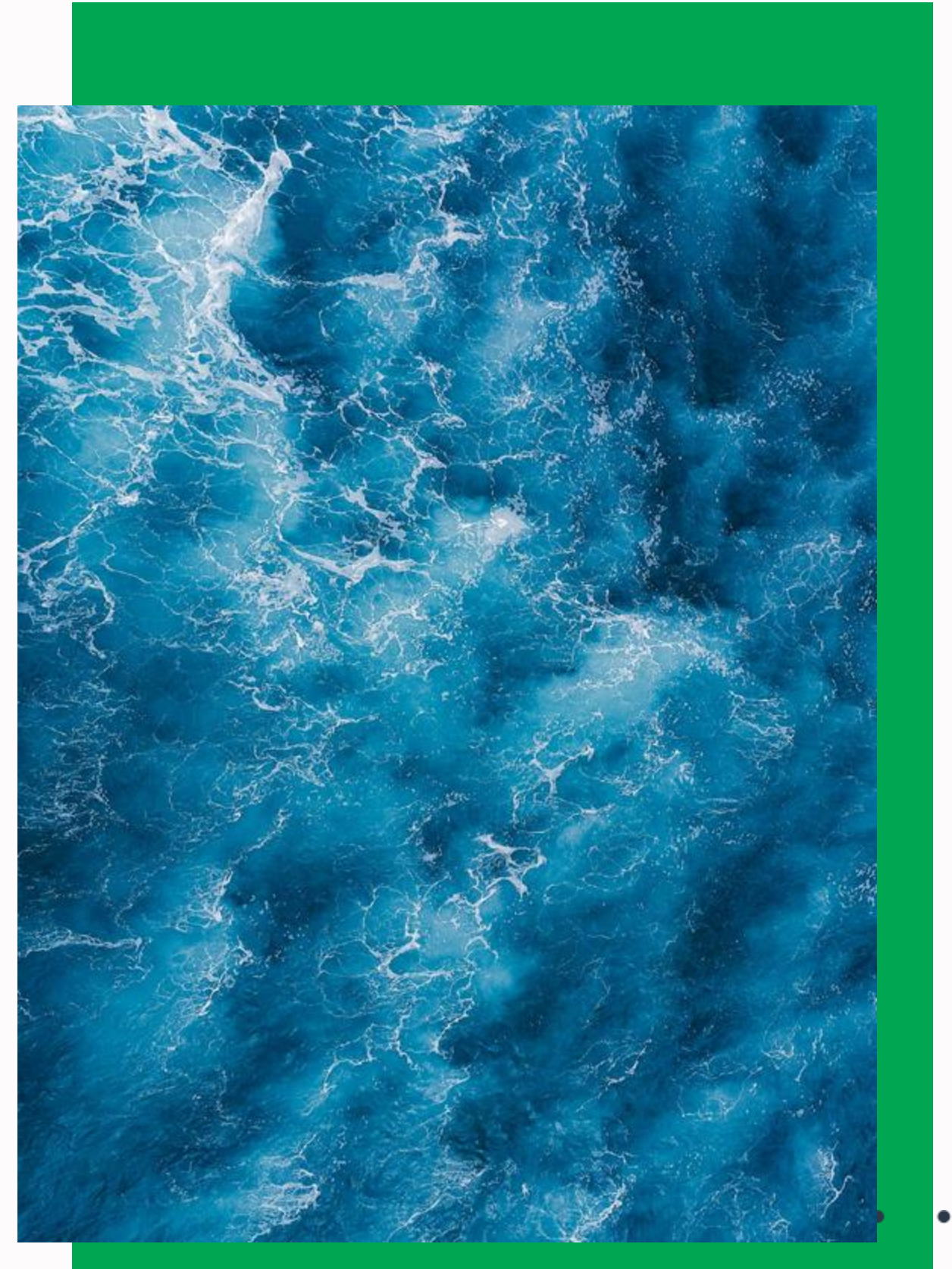
Dibiayai oleh Kesatuan Eropah. Walau bagaimanapun, pandangan dan pendapat yang dinyatakan adalah pandangan pengarang sahaja dan tidak semestinya mencerminkan pandangan Kesatuan Eropah atau Agensi Eksekutif Pendidikan dan Kebudayaan Eropah (EACEA). Kesatuan Eropah mahupun EACEA tidak boleh dipertanggungjawabkan ke atas mereka.

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



Kandungan

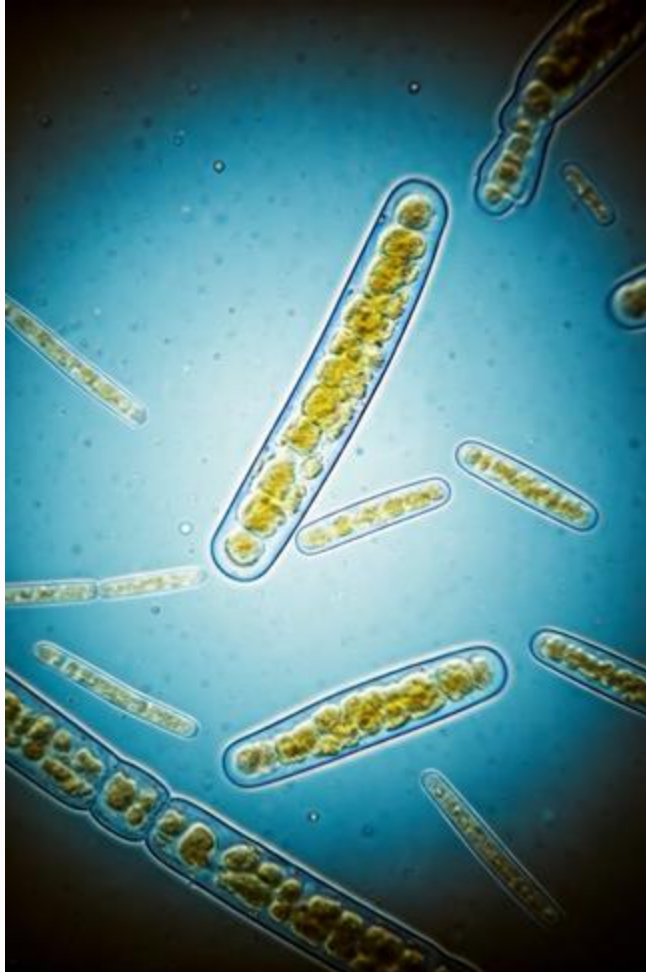
- 01 Gambaran Keseluruhan Bioteknologi Marin
- 02 Potensi Bioteknologi Marin
- 03 Biofuel dan Tenaga
- 04 Enzim Perindustrian
- 05 Bioremediasi
- 06 Pemantauan Alam Sekitar
- 07 Bibliografi – Bacaan Tambahan



Gambaran keseluruhan

Definisi Utama

- Bioteknologi marin, juga dikenali sebagai bioteknologi biru, secara meluas ditakrifkan sebagai aplikasi sains dan teknologi kepada organisma hidup daripada sumber marin, atau bahagian, produk atau model yang diperoleh daripadanya, untuk pengeluaran pengetahuan, barangan dan perkhidmatan (Daniotti et. al 2021 & Freitas et. al. 2012).



Aplikasi

- Industri Farmaseutikal dan Bioperubatan
- Industri Makanan dan Nutraseutikal
- Biofuel dan Tenaga
- Enzim Perindustrian
- Bioremediasi dan Pemantauan Alam Sekitar
- Industri Kosmetik
- Agronomy



Potensi

- **Persekitaran marin meliputi 70% daripada permukaan Bumi** dan merupakan rumah kepada kira-kira lebih sejuta spesies makroskopik dan kira-kira satu bilion spesies mikroorganisma. **Keluasan dan sifat lautan yang sebahagian besarnya belum diterokai bermakna 91% spesies marin masih belum dikelaskan.** Banyak produk daripada invertebrata marin mempunyai potensi sebagai ubat, dengan hampir 10,000 entiti molekul baharu dikenal pasti antara 1990 dan 2009. **Pasaran bioteknologi marin menunjukkan trend pembangunan yang positif,** dengan penerbitan saintifik lebih daripada dua kali ganda dari 2010 hingga 2019. Pertumbuhan yang ketara diunjurkan, **dengan anggaran pertumbuhan tambahan sebanyak \$2.5 bilion dari 2020 hingga 2024 di seluruh dunia, dan lebih \$1.3 bilion di Eropah, dengan sektor farmaseutikal dan makanan menyumbang lebih daripada 60% daripada nilai pasaran.**



Potensi dalam Industri Farmaseutikal dan Bioperubatan

Dadah:

Ubat-ubatan khusus yang diperoleh daripada biodiversiti marin termasuk trabectedin (ubat antitumor daripada semburan laut), vidarabine (antivirus daripada span marin), cytarabine (agen antileukemia daripada span), dan ziconotide (analgesik daripada siput kon).

Antibiotik dan Antimikrob:

Kulat marin telah menghasilkan banyak sebatian antibakteria dan antikulat, termasuk cephalosporins.

Ejen Anti-kanser:

- Sebatian terbitan marin seperti Salinosporamide A (marizomib) daripada Salinispora tropica sedang dalam ujian klinikal Fasa III sebagai agen antikanser
- marinomycins AD dan sebatian daripada Streptomyces sp., menunjukkan sitotoksiti yang kuat terhadap garis sel kanser.
- Nukleosida spongothymidine dan spongouridine daripada span marin Cryptotethia crypta membentuk asas untuk Ara-C, agen antikanser terbitan marin awal.

Aplikasi Terapeutik Lain:

Organisma marin boleh menyediakan sebatian untuk merawat pelbagai keadaan, seperti agen anti-radang (cth, Cyclomarin A daripada bakteria marin dan molekul yang menghalang osteoklastogenesis untuk rawatan osteoporosis, seperti yang dilihat dengan ekstrak tiram Pasifik yang ditapai.



Potensi dalam Industri Farmaseutikal dan Bioperubatan

Peranti Perubatan dan Biomaterial:

Kolagen yang diekstrak daripada obor-obor boleh digunakan untuk peranti perubatan dan biomaterial seperti perancah dan hidrogel untuk penyembuhan luka dan perubatan regeneratif. Gelatin yang berasal dari ikan ialah alternatif kepada gelatin lembu/babi dalam peranti perubatan, menawarkan piawaian keselamatan yang lebih tinggi. Bahan seramik bioaktif daripada karang, cengkerang dan landak laut adalah sumber sintesis hidroksiapatit untuk struktur tulang.

Bahan yang diilhamkan oleh bio:

Bahan komposit bukan organik-organik yang sangat tersusun daripada enzim pembentuk silika span (silicatein) dan cangkerang biosilika berstruktur nano (frustules) daripada diatom untuk produk berteknologi tinggi seperti mikroelektronik.



Potensi dalam Industri Makanan dan Nutrasetikal



- **Polisakarida**, termasuk algin, karagenan, agar-agar, dan fucan sulfat (fucoidans, ulvans), digunakan sebagai **pemekat, penstabil, dan agen pembentuk gel** dalam makanan. Ada juga yang mempamerkan aktiviti antitrombotik, anti-radang, antioksidan, antikanser, dan antidiabetes, atau berpotensi sebagai **serat makanan dan sebatian prebiotik**.
- **Pigmen** seperti karotenoid (cth, astaxanthin, fucoxanthin, β -karotena) dan klorofil. Ini bertindak sebagai prekursor vitamin, antioksidan, dan agen anti-karsinogenik, dan digunakan sebagai pewarna makanan dan antioksidan. Projek SMILE membangunkan ekstrak mikroalga yang kaya dengan fucoxanthin dan omega-3 untuk kawalan berat badan dan fungsi kognitif. Projek VOPSA 2.0 secara khusus bertujuan untuk menghasilkan astaxanthin dan omega-3 daripada mikroalga untuk makanan tambahan.
- **Kitin, kitosan, Kito-oligosakarida (COS)** terutamanya diekstrak daripada krustasea. Ini adalah polimer terbiodegradasi dengan sifat antibakteria, digunakan sebagai **Pengawet makanan** dan sebagai agen anti-kolesterol kerana keupayaan menyerap lemaknya. Di Jepun, kitosan ditambah kepada pelbagai makanan sebagai bahan berfungsi penurun kolesterol.
- **Mineral dan gentian**. Projek Blue Iodine II, sebagai contoh, memberi tumpuan kepada membangunkan produk berasaskan alga yang kaya dengan iodin untuk memerangi kekurangan iodin.

Potensi dalam Industri Makanan dan Nutrasetikal



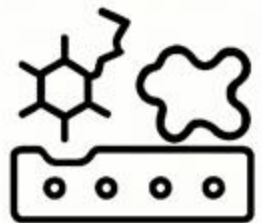
- **Asid lemak tak tepu omega-3 (PUFA)**, seperti EPA, ARA, dan DHA, diperoleh daripada ikan, mikroalga dan thraustochytrids, yang telah terbukti kardioprotektif, sifat antioksidan, dan faedah untuk perkembangan visual dan neurologi. Projek LIFEOMEGA, sebagai contoh, membangunkan produk pemakanan yang kaya dengan EPA untuk pesakit kanser. Thraustochytrids diiktiraf sebagai sumber PUFA marin yang semakin penting dan mesra alam, menawarkan alternatif kepada minyak ikan kerana kebimbangan kemampunan, bau hanyir biasa dan kestabilan oksidatif yang lemah.
- **Vitamin, protein, peptida, dan asid amino** seperti taurin, kebanyakannya penting untuk kesihatan manusia. Hidrolisat protein daripada ikan, sebagai contoh, boleh meningkatkan sistem imun dan digunakan dalam industri makanan kesihatan dan nutrasetik.
- **Polisakarida**, termasuk algin, karagenan, agar-agar, dan fucan sulfat (fucoidans, ulvans), digunakan sebagai **pemekat, penstabil, dan agen pembentuk gel** dalam makanan. Ada juga yang mempamerkan aktiviti antitrombotik, anti-radang, antioksidan, antikanser, dan antidiabetes, atau berpotensi sebagai **serat makanan dan sebatian prebiotik**.



Teknologi Pemprosesan dalam Pembangunan Industri Makanan dan Nutraseutikal

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 marin adalah penting untuk pemprosesan makanan, menawarkan kelebihan kerana aktiviti dan kestabilannya dalam keadaan yang melampau seperti suhu tinggi, kemasinan, dan pelbagai tahap pH. Mereka boleh menukar produk sampingan marin dengan cekap kepada bahan berfungsi, menawarkan pendekatan yang lebih mampan dan kos efektif daripada kaedah kimia tradisional. Contohnya termasuk protease, lipase, amidas, kitinase, dan lyase alginat.
- **Teknologi Penanaman (Kilang Sel):** Makroalga, mikroalga, diatom, dan cyanobacteria ditanam dalam kedua-duanya **sistem terbuka (kolam)** dan **sistem tertutup (fotobioreaktor atau fermentasi)**. Kaedah ini membolehkan pengeluaran biojisim terkawal dan sebatian bernilai tinggi, dengan kelebihan seperti mengeksploitasi tenaga suria, mengurangkan bahan pencemar udara, dan mencapai produktiviti dan kualiti biojisim yang lebih tinggi dalam persekitaran terkawal. **Penanaman heterotrofik dan mixotrophic** dalam fermentasi boleh memberikan proses yang lebih terkawal dan kos efektif.
- **Kaedah Pengekstrakan:** Teknik pengekstrakan lanjutan dan mesra alam seperti **pengekstrakan cecair superkritikal (SFE)** dan **pengekstrakan air subkritikal (SWE)** digunakan untuk mendapatkan bahan-bahan berfungsi, menawarkan selektiviti yang tinggi dan kesan alam sekitar yang berkurangan berbanding kaedah konvensional. Teknik "memerah susu" juga sedang diterokai untuk pengekstrakan metabolit yang tidak merosakkan dan regeneratif daripada organisma marin.
- **Genetic and Metabolic Engineering:** Teknik yang berkembang pesat ini, terutamanya untuk mikroalga, digunakan untuk **meningkatkan hasil produk** dan ciri-ciri. Mereka membenarkan manipulasi terkawal organisma marin untuk mengoptimumkan pengeluaran sebatian tertentu. Sebagai contoh, kejuruteraan metabolik boleh meningkatkan kapasiti untuk menghasilkan karotenoid antioksidan. Teknologi DNA rekombinan juga digunakan untuk meningkatkan produktiviti organisma atau meningkatkan ciri-ciri produk, seperti meningkatkan pengeluaran asid lemak omega-3 atau meningkatkan kualiti daging ikan.

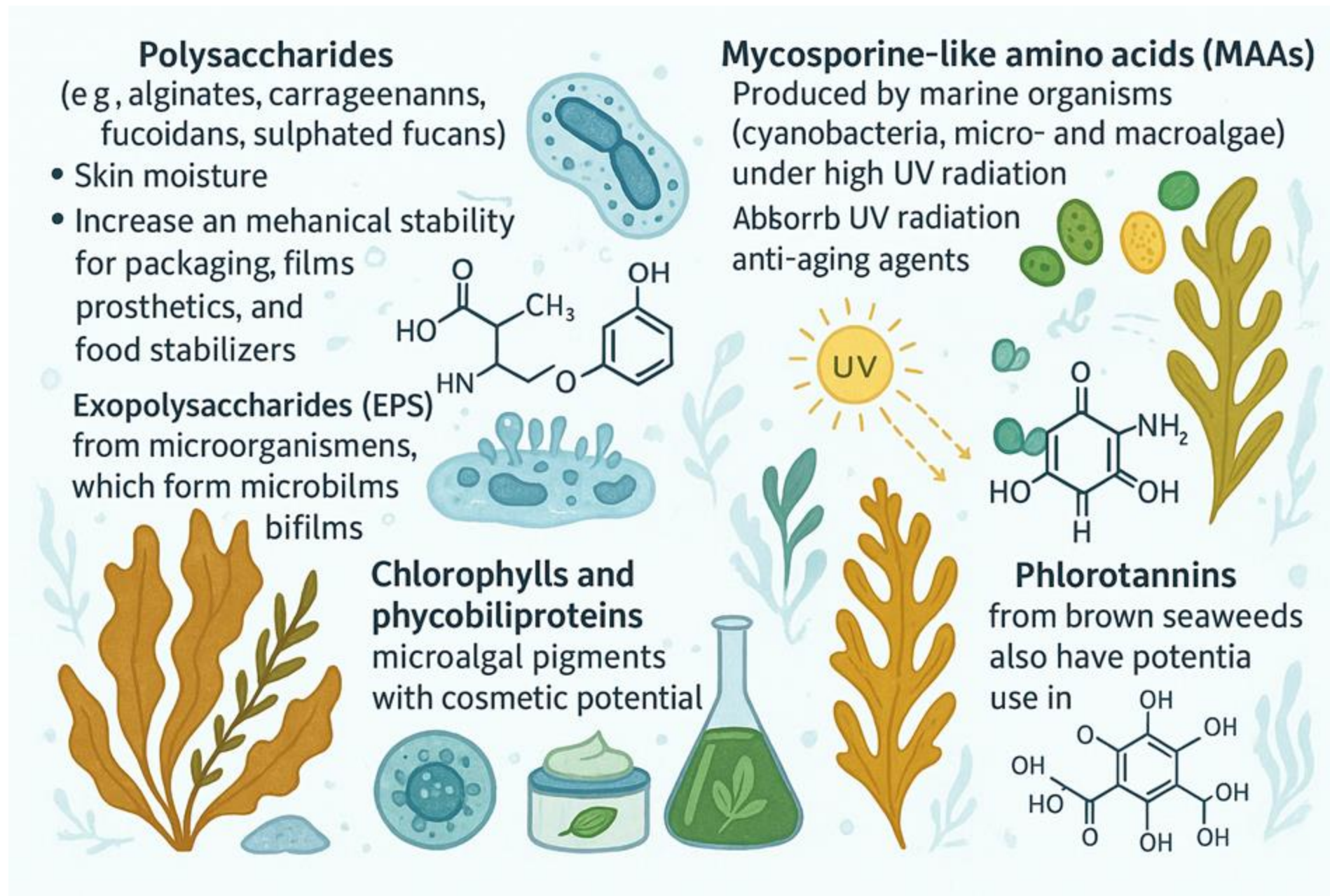


Potensi dalam Industri Kosmetik

- **Alga (Makroalga dan Mikroalga):** Digunakan secara meluas untuk mengekstrak mineral, gentian, dan metabolit sekunder seperti **lipid dan karotenoid** untuk makanan tambahan atau bahan tambahan nutraseutik, yang juga mempunyai aplikasi kosmetik.
 - **Karotenoid** (cth, astaxanthin, fucoxanthin, β -karotena, lutein) bertindak sebagai **prekursor vitamin, antioksidan, dan agen anti-karsinogenik**. Mereka digunakan sebagai **Pewarna makanan dan antioksidan** dan sedang diterokai untuk mereka **aktiviti anti-radang dan anti-penuaan**, dan untuk mengurangkan risiko keadaan seperti diabetes. Contoh khusus termasuk:
 - Astaxanthin daripada *Haematococcus pluvialis* dianggap sebagai "antioksidan super" dengan aplikasi dalam nutraseutikal dan kosmetik manusia. Projek VOPSA 2.0 secara khusus bertujuan untuk menghasilkan astaxanthin daripada mikroalga untuk makanan tambahan, dengan *Nealgae* membangunkan barisan kosmetik, Alskin, termasuk krim muka dengan ekstrak *Haematococcus pluvialis* yang kaya dengan astaxanthin.
 - Fucoxanthin dan asid lemak omega-3 daripada mikroalga, seperti yang dilihat dalam projek SMILE, telah dibangunkan untuk produk nutraseutikal yang juga menyokong fungsi kognitif dan kawalan berat badan, menunjukkan manfaat kesihatan yang lebih luas yang boleh digunakan untuk kesejahteraan dan penampilan.
 - β -karotena daripada *Dunaliella salina* ialah satu lagi pigmen yang dihasilkan secara komersial daripada mikroalga.

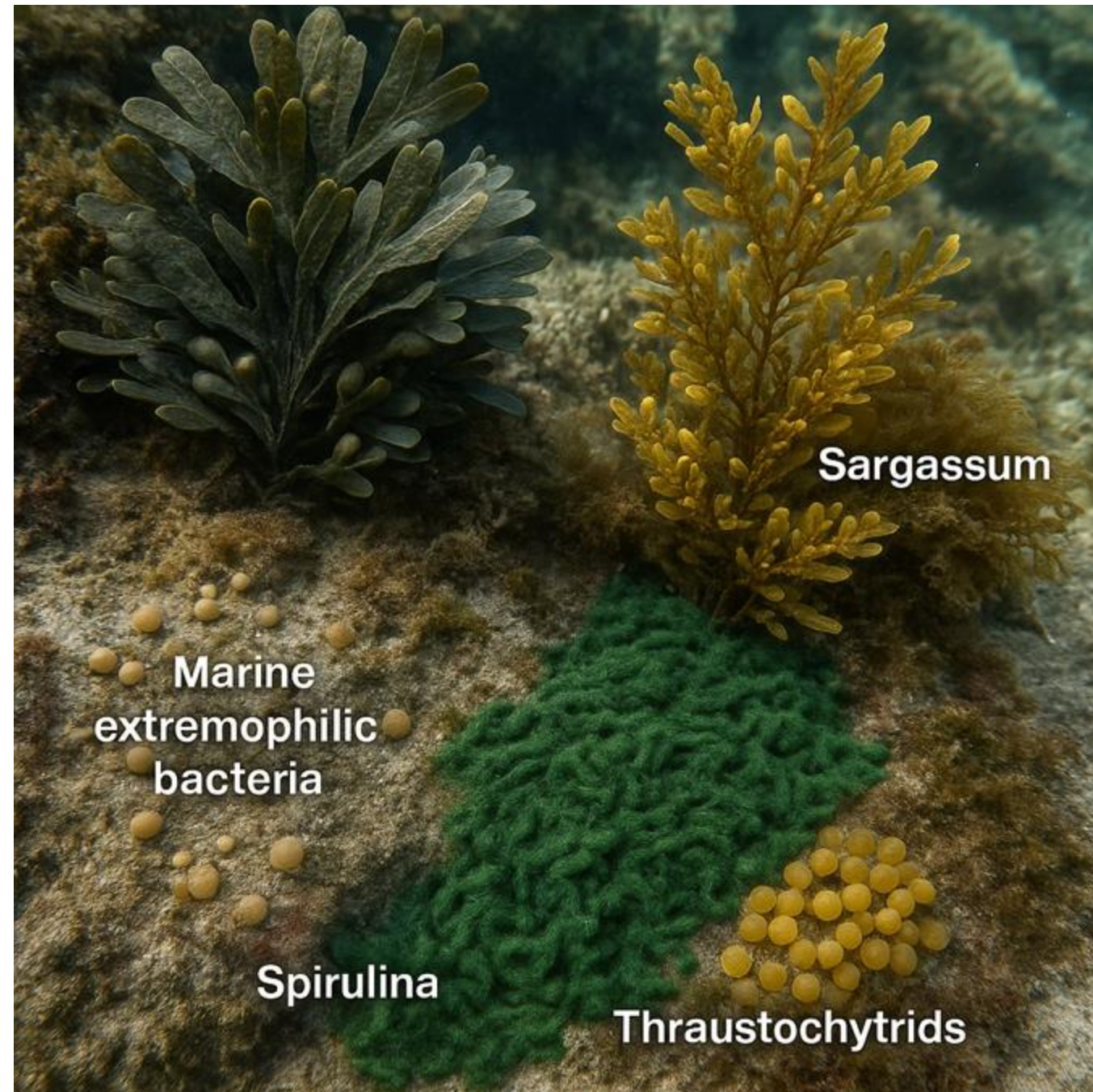


Potensi dalam Industri Kosmetik



- **Polisakarida** (cth, alginat, karagenan, fucoidans, fucans sulfat) digunakan sebagai **pemekat, penstabil, dan agen pembentuk gel**. Ada juga yang mempamerkan **aktiviti antikoagulan, antibakteria, antivirus dan antikulat**. Exopolysaccharides (EPS) daripada mikroorganisma, yang membentuk komponen utama biofilm, boleh **meningkatkan kelembapan kulit** dan menyediakan kestabilan mekanikal untuk bahan seperti pembungkusan, filem, prostetik dan penstabil makanan.
- **Asid amino seperti mycosporine (MAA)**, dihasilkan oleh organisma marin (cyanobacteria, mikro, dan makroalga) di bawah tekanan UV yang tinggi, menyerap sinaran UV dan dianggap **Ejen fotoprotektif dan anti-penuaan**.
- **Klorofil dan phycobiliprotein** juga merupakan pigmen mikroalga dengan potensi kosmetik.
- **Phlorotannins** daripada rumpai laut coklat juga mempunyai potensi kegunaan dalam kosmetik.

Potensi dalam Industri Kosmetik



- Rumpai laut invasif, seperti spesies Fucus dan Sargassum, boleh dinilai untuk produk penjagaan kulit, juga mengurangkan kesan buruk terhadap biodiversiti tempatan. **Mikroorganisma Marin (Bakteria, Kulat, Thraustochytrids, Cyanobacteria)**: Ini semakin diiktiraf sebagai sumber metabolit sekunder yang pelbagai untuk kosmetik.
 - Bakteria ekstremofilik marin, disesuaikan dengan pelbagai persekitaran marin yang melampau, menawarkan sifat unik.
 - Kulat marin ialah sumber metabolit aktif farmakologi yang menjanjikan.
 - Cyanobacteria, seperti Arthrospira (Spirulina), menghasilkan pelbagai metabolit sekunder bioaktif dengan **aktiviti antimikrob, anti-radang, antioksidan, antikoagulan, antikanser, antipprotozoal, dan antivirus**, menjadikannya sesuai untuk aplikasi perubatan, makanan dan kosmetik.

Potensi dalam Industri Kosmetik



- **Haiwan Laut dan Produk Sampingan:**

- **Ikan** adalah sumber **Asid lemak tak tepu omega-3** (PUFA) dengan sifat kardioprotektif dan antioksidan, juga digunakan dalam kosmetik.
- **Kolagen dan gelatin** Diperoleh daripada obor-obor marin dan produk sampingan ikan adalah bahan berfungsi yang sangat baik untuk industri kosmetik. Jellagen PTY Ltd, sebagai contoh, memasarkan kolagen obor-obor untuk peranti perubatan dan biobahan.
- **Kitin** Dari krustasea digunakan sebagai bahan aktif dalam kosmetik.
- **Peptida bioaktif** Daripada sisa pemprosesan ikan dan kerang boleh digunakan dalam nutraseutikal dan farmaseutikal. Peptida yang diperoleh daripada Chlorella telah menunjukkan kesan perlindungan terhadap kerosakan yang disebabkan oleh UV dalam fibroblas kulit manusia.
- **Enzim dan peptide** daripada sumber marin boleh bertindak sebagai agen anti-penuaan dengan melindungi simpanan kolagen.
- **Rumput laut:** *Zostera noltii* dan *Z. marina* rumpai laut terdampamengandungi **asid rosmarinic**, sebatian fenolik dengan kepentingan ekonomi untuk industri kosmetik. Daun detrital *Cymodocea nodosa* mengandungi jumlah yang tinggi **asid chicoric**, sebatian fenolik dengan aplikasi terapeutik dan nilai tinggi dalam pasaran nutraseutikal.



Faedah Produk, Formulasi dan Produk Contoh Sebenar

Examples of cosmeceuticals utilizing algal extracts



• Faedah dan Formulasi Produk

- Sebatian terbitan marin membekalkan bahan aktif dengan **Sifat antioksidan, pelembap, anti-radang dan fotoprotektif** untuk krim dan losyen.
- Mereka menyumbang kepada **kesan anti-kedutan dan anti-penuaan**, selalunya dengan melindungi kolagen.
- Banyak produk penjagaan kulit marin di pasaran bukan sebatian tulen tetapi **ekstrak yang dirawat atau campuran yang diperkaya**.

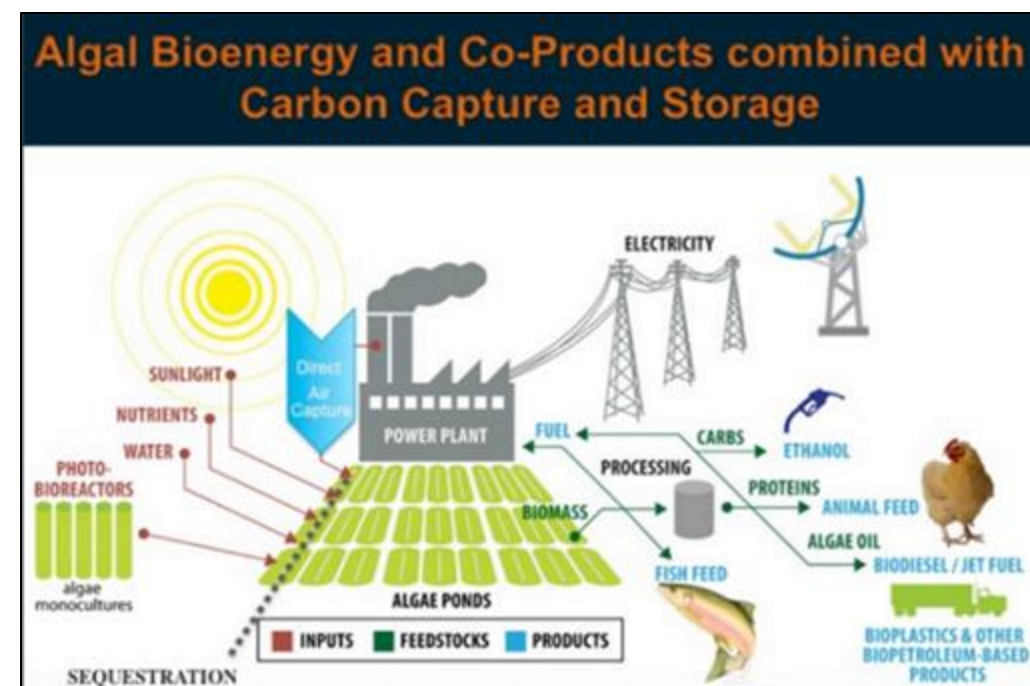
- Contoh kosmetik yang menggunakan ekstrak alga termasuk Biotherm®, La Mer®, Elemis®, OceanBasis®, alga® Guam dan La Prairie®. Ekstrak mikroalga terdapat dalam Dermochlorella DG®, XCELL-30®, Asid Alguronik® dan Alguard®. Ekstrak kulat digunakan dalam Eyedeline dan Brightlette oleh Lipotec.
- Polimer marin, seperti SeaCode® daripada Pseudoalteromonas sp., digunakan untuk menenangkan, mengurangkan kerengsaan, dan menyediakan sifat penghidratan dan anti-kedutan.
- Mikroorganisma marin ekstremofilik menghasilkan bahan kosmetik yang kuat seperti Hyadisine®, Antarticine®, dan Hyafini®.



Biofuel dan Tenaga

Sumber Biofuel dan Pembawa Tenaga daripada Organisma Marin:

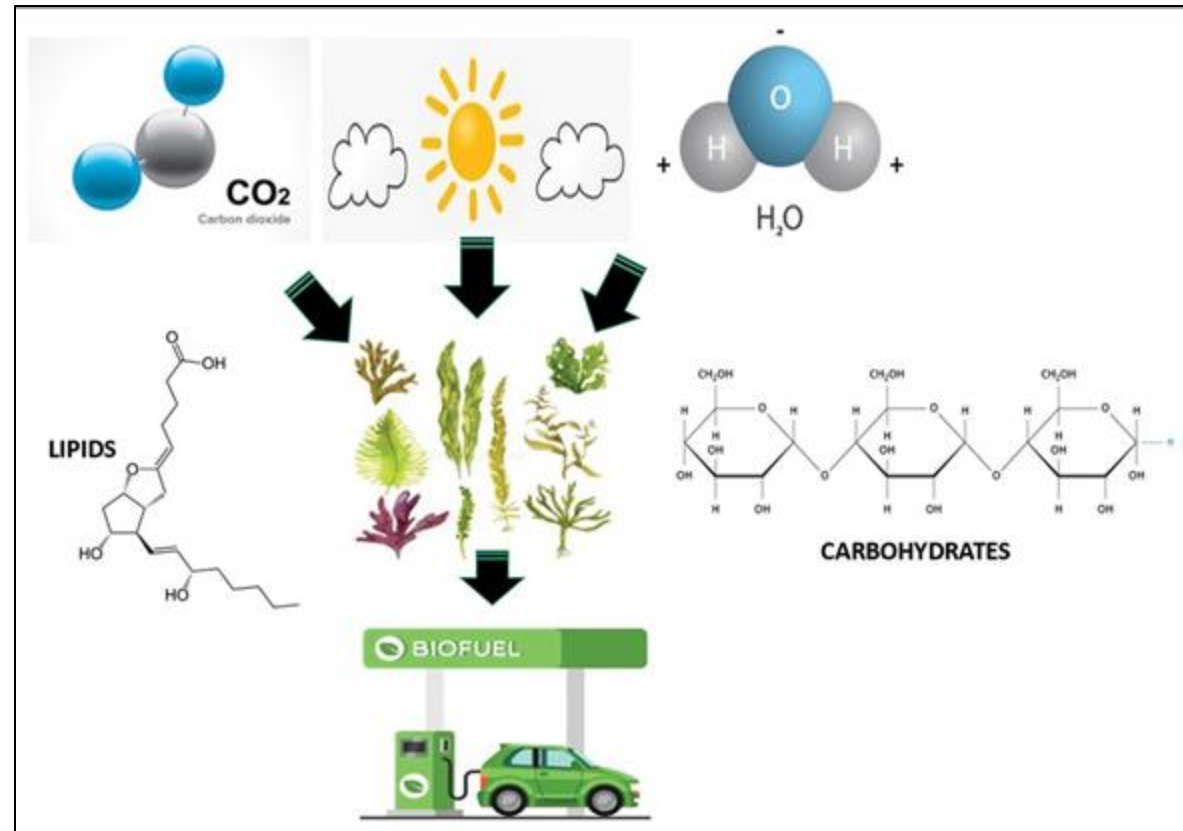
- **Alga (Makroalga dan Mikroalga):** Ini amat menjanjikan kerana keupayaan mereka untuk menjana sejumlah besar molekul bioaktif dan produktiviti yang tinggi.
 - **Mikroalga** dianggap sebagai pengeluar penting bagi sebatian yang sangat bioaktif dan boleh meningkatkan profil pemakanan makanan kerana kekayaannya dalam asid lemak tak tepu ganda (PUFA) dan pigmen. Mereka adalah sumber yang menjanjikan untuk biofuel kerana komposisi kimia dan kelimpahan globalnya, dengan beberapa spesies mampu menghasilkan lebih banyak tenaga per tan daripada tanaman konvensional. Mereka boleh tumbuh dalam fotobioreaktor atau kolam terbuka, mengeksplotasi tenaga suria dan gas rumah hijau, yang juga membantu mengurangkan pencemaran udara.
 - **Makroalga (rumpai laut)** boleh ditukar kepada pembawa tenaga seperti metana (biogas) atau bioetanol melalui penapaian. Mereka juga menawarkan kelebihan untuk tidak bersaing dengan tanaman makanan untuk tanah atau sumber air tawar. Spesies invasif seperti *Fucus* dan *Sargassum* boleh dinilai untuk tenaga.
 - **Thraustochytrids:** Mikroorganisma oleaginous ini merupakan sumber PUFA marin yang semakin penting, terutamanya DHA, dan juga berpotensi squalene dan karotenoid, yang merupakan sebatian penting secara komersial dengan potensi pasaran yang semakin meningkat. Mereka juga diketahui menghasilkan asid lemak tepu, berfungsi sebagai sumber boleh diperbaharui untuk biofuel seperti biodiesel.
 - **Mikroorganisma (Bakteria, Kulat, Cyanobacteria):** Cyanobacteria, seperti *Arthrospira* (*Spirulina*), mempunyai potensi untuk pengeluaran biohidrogen. Bakteria marin telah diterokai untuk menghasilkan biofuel seperti bioetanol.



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



Biofuel dan Tenaga



(Source: Olanrewaju, et. Al. 2024)

Jenis Biofuel dan Aplikasi Tenaga:

- **Biodiesel:** Mikroalga, dengan kandungan lipidnya yang tinggi, dinilai secara meluas untuk pengeluaran biodiesel. Usaha termasuk mengoptimumkan keadaan pertumbuhan dan pengubahsuaian genetik spesies seperti *Nannochloropsis* dan *Phaeodactylum tricornutum*.
- **Bioetanol:** Makroalga dan mikroalga boleh ditapai untuk menghasilkan bioetanol. Penggunaan sisa biojisim marin yang berlebihan dan berlebihan untuk pengeluaran bioetanol dan biogas digalakkan untuk mengelakkan persaingan dengan industri biopolimer.
- **Biogas (Metana):** Rumpai laut boleh ditapai menjadi metana. Pengeluaran serentak biometana mudah terbakar dan pelupusan biojisim marin yang tidak diingini adalah konsep pengurusan sisa sinergistik dengan faedah alam sekitar.
- **Biohidrogen:** Penyelidikan asas sedang membangunkan pengeluaran langsung hidrogen (H₂) oleh mikroorganisma marin.
- **Sistem Tenaga Lain:** Rumpai laut boleh digunakan dalam sistem tenaga boleh diperbaharui sebagai alternatif kepada elektrolit pepejal dalam sel fotovoltaik peka pewarna, menyediakan alternatif kos rendah dan mesra alam kepada kompleks logam mahal.

Biofuel dan Tenaga

Teknologi dan Proses Pengeluaran:

- **Kilang Sel:** Penanaman organisma marin dalam "kilang sel" (makroalga, mikroalga, diatom, cyanobacteria) boleh dilakukan dalam sistem terbuka (kolam) atau sistem tertutup/tiruan (bioreaktor).
 - **Kolam Terbuka:** Menawarkan kos yang lebih rendah dan kapasiti pengeluaran yang tinggi, menggunakan tenaga suria untuk pengeluaran biojisim. *Dunaliella salina* untuk β -karotena ialah contoh penanaman kolam terbuka yang berjaya.
 - **Fotobioreaktor(PBRs):** Menyediakan kawalan parameter pertumbuhan yang lebih baik (nutrien, suhu, pH, CO₂, O₂), mencegah pencemaran, dan membolehkan kepekatan sel dan produktiviti isipadu yang lebih tinggi. Mereka datang dalam pelbagai reka bentuk (rata, tiub, heliks). Walaupun menawarkan produktiviti yang lebih tinggi, ia biasanya lebih mahal dan intensif tenaga daripada sistem terbuka.
- **Penanaman Tekanan (Proses Memerah Susu):** Teknik seperti penanaman tekanan bertujuan untuk meningkatkan pengeluaran metabolit sekunder dengan mengeluarkannya secara berterusan sambil mengekalkan kultur aktif.
- **Penanaman Heterotrofik dan Mixotrophic:** Sesetengah strain alga dan cyanobacteria boleh tumbuh secara heterotrof dalam penapai menggunakan sumber karbon seperti glukosa, yang boleh menjadi lebih murah dan lebih terkawal daripada penanaman fotoautotrofik.
- **Teknologi Pengekstrakan:** Proses bersih seperti pengekstrakan air, pengekstrakan cecair superkritikal (SFE) dan pengekstrakan air subkritikal (SWE) dikaji untuk mengekstrak bahan berfungsi seperti lipid dan fenol. SFE menggunakan karbon dioksida dianggap sebagai kaedah hijau, tidak toksik, murah dan tidak mudah terbakar untuk pemprosesan asid lemak omega-3.
- **Konsep Biorefinery:** Pendekatan ini menyepadukan proses penukaran biojisim untuk menghasilkan bahan kimia, bahan api, kuasa dan haba bernilai tambah daripada pelbagai jenis biojisim aliran sampingan (sisa). Biopenapisan marin bertujuan untuk menghasilkan bahan aktif biologi bernilai lebih tinggi daripada biobahan sisa marin. Pendekatan lata mengeksploitasi semua sebatian bioaktif, dengan sisa biologi dinilai sebagai makanan atau untuk biotenaga.
- **Proses Enzimatik:** Enzim marin adalah penting untuk rantai nilai biorefinery, terutamanya dalam pra-rawatan biojisim. Mereka boleh memudahkan penukaran minyak bahan mentah kepada biodiesel, dan meningkatkan kecekapan pengekstrakan sebatian bioaktif tertentu daripada rumpai laut.

Kelebihan Biofuel Marin:

- **Produktiviti Tinggi:** Mikroalga mempunyai potensi produktiviti sepuluh kali ganda lebih besar daripada tanaman pertanian.
- **Penggunaan Tanah Bukan Pertanian:** Pengeluaran boleh berlaku di tanah bukan pertanian, mengelakkan persaingan dengan pengeluaran makanan.
- **Penggunaan Sisa:** Alga boleh menggunakan air sisa sebagai sumber nutrien dan/atau



Enzim Perindustrian

- **Mikroorganisma Marin:** Bakteria, kulat dan archaea adalah sumber yang tidak ternilai kerana kebolehsuaian mereka kepada keadaan yang melampau dan keupayaan mereka untuk menghasilkan banyak metabolit dan enzim sekunder. Lebih 120 genom archaea hipertermofilik, sebagai contoh, telah diujukan, mendedahkan strain menarik seperti *Pyrococcus*, *Thermococcus* dan *Thermotoga* yang menghasilkan ekstremozim yang teguh. Kulat marin, khususnya, adalah pengeluar prolifik pelbagai enzim, menyumbang peratusan besar produk semula jadi yang baru diterangkan.
- **Alga (Makroalga dan Mikroalga):** Walaupun lebih dikenali untuk biofuel, organisma ini juga mengandungi enzim, dan proses yang melibatkan biojisim mereka sering menggunakan enzim untuk pecahan dan penukaran.
- **Thraustochytrids:** Mikroorganisma oleaginous ini diiktiraf untuk lipase ekstraselular baru dan enzim hidrolitik lain seperti agaras, amilase, pektinase, kitinase dan karagenase, sesuai untuk pelbagai aplikasi industri.
- **Invertebrata Marin:** Enzim juga diekstrak daripada invertebrata marin, walaupun banyak penyelidikan memberi tumpuan kepada mikroorganisma yang berkaitan.



Aplikasi Perindustrian Enzim Marin

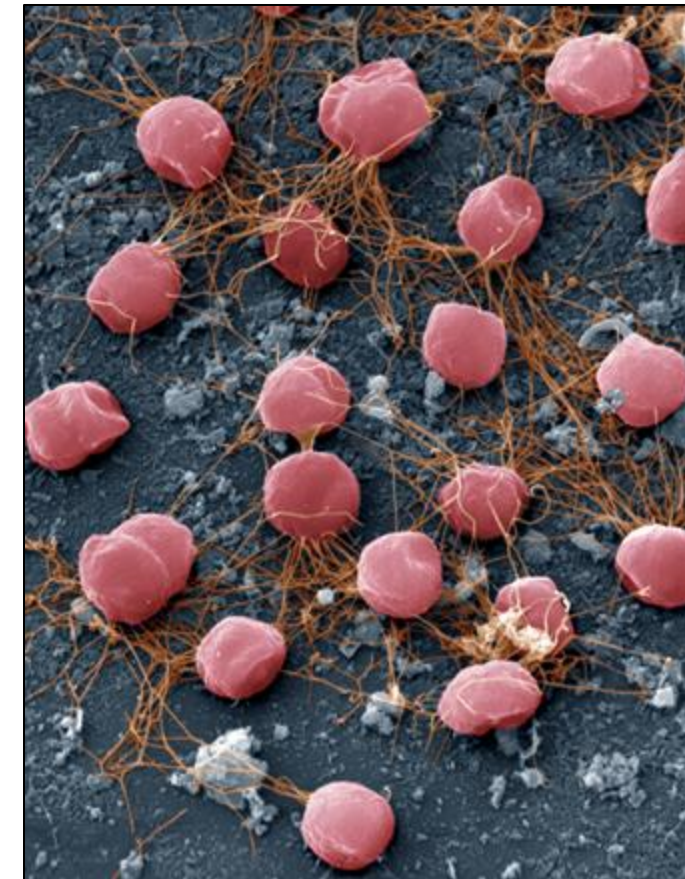
- **Rantaian Nilai Biorefinery:** Ini adalah kawasan penting, di mana enzim marin digunakan dalam **Pra-rawatan biojisim** (cth, daripada akuakultur seperti alga dan rumpai laut) untuk menghasilkan bahan mentah berasaskan karbon boleh diperbaharui, dan juga untuk memanipulasi minyak bahan mentah untuk **pengeluaran biodiesel**.
 - Contohnya termasuk **selulase** dan lain-lain **enzim aktif karbohidrat** (seperti hemiselulase, pektinase, protease, dan amilase) daripada mikrob marin, yang diterokai untuk sakarifikasi biojisim rumpai laut. **Lipase** dinilai secara meluas untuk menukar pelbagai minyak bahan mentah kepada biodiesel.
 - Aliran sisa daripada pembuatan sotong atau pemprosesan kerang boleh dinilai oleh hidrolisis enzimatik untuk menghasilkan suplemen nutrien untuk penanaman bakteria, atau untuk pengeluaran bioetanol dan biogas.
- **Industri Makanan:** Enzim marin digunakan dalam pemprosesan makanan, menawarkan kelebihan berbanding enzim tradisional kerana aktivitinya dalam keadaan luar biasa.
 - Ia digunakan untuk pengeluaran **Bahan-bahan berfungsi** seperti peptida dengan sifat antihipertensi dan imunomodulator daripada protein ikan.
 - **Enzim aktif sejuk** amat berguna dalam industri makanan dan minuman untuk memproses produk sensitif haba, mengekalkan kualiti pemakanan dan organoleptiknya.
 - Pendekatan enzimatik juga diterokai untuk **penyahbau minyak ikan** dan untuk **pengeluaran kitin dan kitosan** daripada sisa kerang.



Aplikasi Perindustrian Enzim Marin

- **Kimia Halus dan Teknik Makmal:** Enzim marin membolehkan **pengekstrakan atau pengubahsuaian yang selektif dan cekap** molekul marin kompleks, menyumbang kepada proses mampan dalam kimia halus.
 - Mereka digunakan untuk **sintesis produk baru** dan untuk **meningkatkan kecekapan pengekstrakan** sebatian bioaktif tertentu daripada rumpai laut.
 - Contoh khusus termasuk pengeluaran **glukosa daripada salad laut** menggunakan enzim arnab laut, dan sintesis asimetri D-metil laktat oleh esterase mikrob marin.
 - **Pfu polymerase** dari *Pyrococcus furiosus*, mikroorganisma marin ekstremofilik, ialah contoh terkenal yang digunakan dalam PCR untuk kesetiaan replikasi tinggi dalam aplikasi makmal.
- **Bioremediasi dan Aplikasi Alam Sekitar:** Enzim marin memainkan peranan penting dalam **bioremediasi** dengan mengubah bahan toksik kepada sebatian yang kurang berbahaya, mengintegrasikannya ke dalam kitaran biogeokimia.
 - Mikroorganisma mensintesis enzim yang boleh **merendahkan plastik** (lipase, alkana hidroksilase, laccase) dan terlibat dalam **penyahwarnaan efluen industri**.
 - Kulat marin dan laccasnya digunakan secara khusus dalam industri tekstil untuk merawat efluen masin.
 - **Anhidrase karbonik** daripada ekstremofil marin sedang disiasat untuk **Penyerapan CO2** dan sebagai **biomarker** untuk pemantauan alam sekitar.

Pyrococcus furiosus



(Sumber: Kengen S.W.M.
2017)



Teknologi Pengeluaran Enzim Marin

Kilang Sel & Bioreaktor: Penanaman organisma marin dalam "kilang sel" (makroalga, mikroalga, bakteria, kulat) berlaku di kolam terbuka atau terkawal **fotobioreaktor (PBRs)** dan penapai. Walaupun PBR menawarkan kawalan yang lebih baik ke atas parameter pertumbuhan dan produktiviti isipadu yang lebih tinggi, ia biasanya lebih mahal dan intensif tenaga.

- **Metagenomik:** Pendekatan genetik ini membolehkan kajian campuran mikrob kompleks daripada persekitaran marin, mengenal pasti gen yang terlibat dalam biosintesis sebatian bioaktif, yang membawa kepada **penemuan enzim baru** walaupun daripada mikroorganisma yang tidak boleh dikultur. Projek INMARE, sebagai contoh, menjana koleksi enzim genomik dan metagenomik yang besar untuk operasi perindustrian.
- **Kejuruteraan Genetik dan Metabolik:** Teknik seperti teknologi DNA rekombinan dan kejuruteraan metabolik digunakan untuk **meningkatkan produktiviti** organisma atau meningkatkan hasil dan ciri-ciri produk dengan mengoptimumkan laluan metabolik dan menyatakan enzim dalam perumah yang sesuai.
- **Teknologi Bio-pemprosesan: Hidrolisis pengantara enzim** ialah teknologi bio-pemprosesan utama yang menambah nilai kepada produk sampingan marin. Kaedah seperti **bioreaktor membran** Dilengkapi dengan membran ultrafiltrasi digunakan untuk pemulihan bahan berfungsi yang cekap.
- **Teknologi Pengekstrakan:** Teknologi baharu dan bersih alam sekitar, seperti **pengekstrakan cecair superkritikal (SFE)** dan **pengekstrakan air subkritikal (SWE)**, dikaji untuk mengekstrak bahan berfungsi, termasuk enzim, menggunakan pelarut bukan toksik. **Pengekstrakan berbantuan enzim (EAE)** Kaedah sedang dibangunkan untuk meningkatkan kecekapan dan mengurangkan masa pengekstrakan. **"Proses memerah susu"** ialah teknik pengekstrakan regeneratif yang tidak merosakkan yang membolehkan penyingkiran metabolit secara berterusan sambil mengekalkan kultur aktif, mengurangkan kos yang berkaitan dengan penuaian dan gangguan sel.



Degradasi Bahan Pencemar

- **Hidrokarbon dan Aromatik:** Bakteri marin daripada filum seperti Proteobacteria, Actinobacteria, Cyanobacteria, Bacteroidetes dan Firmicutes digunakan untuk merendahkan bahan pencemar aromatik, seperti hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH), dalam sedimen yang tercemar minyak dan tumpahan petroleum. Taksa bakteria yang merendahkan hidrokarbon tertentu telah ditemui pada serpihan marin plastik, mencadangkan potensinya dalam degradasi plastik.
- **Plastik:** Mikroorganisma mensintesis enzim seperti **lipase, alkana hidroksilase, dan laccases** yang boleh merendahkan plastik.
- **Efluen Perindustrian:** Kulat marin yang menghasilkan enzim yang merendahkan lignin digunakan untuk **penyahwarnaan efluen yang sangat berwarna** daripada kertas, kilang pulpa, tekstil, dan industri pembuatan pewarna. Kulat ini juga menunjukkan keupayaan degradasi minyak yang kuat.
- **Efluen Masin:** Kulat marin dan laccases mereka digunakan secara khusus dalam industri tekstil untuk merawat efluen masin.
- **Bahan Pencemar Lain:** Mikroalga telah menunjukkan potensi dalam merendahkan bahan cemar yang muncul seperti farmaseutikal dan produk penjagaan diri.
- **Mekanisme:** Keupayaan metabolik organisma semula jadi membolehkan mereka mengubah bahan toksik menjadi sebatian yang kurang berbahaya. Kajian telah meneroka degradasi anaerobik hidrokarbon kompleks oleh komuniti bakteria sedimen marin dan pengurangan enzimatik kromat oleh bakteria pengurangan sulfat.

Penyingkiran Logam Berat

- **Bioakumulasi:** Kedua-dua mikroalga dan makroalga boleh **biokumpul logam berat** seperti arsenik, kadmium, merkuri, dan plumbum, mengeluarkannya dari perairan sekitarnya.
- **Spesies mikroalga:** Genera seperti *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Tetraselmis*, dan *Arthrospira* dilaporkan tentang kapasiti pengambilan logam berat toksik yang tinggi.
- **Mekanisme:** Mikroalga mengeluarkan logam berat melalui kedua-duanya **penjerapan** (penjerapan permukaan pantas oleh polisakarida dinding sel dan kumpulan berfungsi) dan **serapan** (proses yang lebih perlahan dan memerlukan tenaga ke dalam bahagian dalam sel). Mereka juga mensintesis peptida pengikat logam, seperti metallothionein yang kaya dengan sistein, untuk meneutralkan kesan toksik.

Bioremediasi

Penyingkiran Nutrien dan Rawatan Sisa

- **Rawatan Air Sisa:** Mikroalga, rumpai laut dan kerang boleh mengeluarkan nutrien daripada air sisa industri dan akuakultur. Sebagai contoh, penanaman mikroalga pada najis babi yang dicairkan boleh digunakan untuk pengeluaran elektrik atau sebagai makanan.
- **Biopenapis:** Kerang bertindak sebagai penapis semula jadi untuk mengekstrak mikroalga daripada air laut yang digunakan sebagai air penyejukan atau berhampiran ladang ikan. Biofilem juga digunakan sebagai **biopenapis dalam sistem akuakultur peredaran semula** untuk menukar ammonia kepada nitrat, memulihkan keadaan sihat untuk ikan dan udang ternakan.
- **Valorisasi Produk Sampingan:** Aliran sisa daripada pemprosesan makanan laut (cth, pembuatan sotong, pemprosesan kerang) boleh dinilai oleh hidrolisis enzimatik untuk menghasilkan suplemen nutrien untuk penanaman bakteria, atau untuk pengeluaran bioetanol dan biogas.

Mitigasi Perubahan Iklim

- **Penangkapan Karbon:** Mikro dan makroalga menyumbang dengan ketara kepada **penangkapan karbon** dengan menyerap karbon dari atmosfera, dengan sebahagian besar biojisim makroalga diangkut ke laut dalam dan sedimen untuk penyerapan jangka panjang.
- **Anhidrase Karbonik:** Enzim daripada ekstremofil marin, seperti anhidrase karbonik, disiasat untuk **Penyerapan CO₂** kerana peranan mereka dalam penangkapan CO₂ biomimetik.
- **Pengurangan Pelepasan Metana:** Menambah rumpai laut merah marin *Asparagopsis taxiformis* sebagai pindaan makanan kepada ternakan telah terbukti mengurangkan pelepasan metana enterik sehingga 98%.

Antifouling: Organisma marin dan sebatianannya, terutamanya daripada span dan bakteria tertentu, diterokai untuk aktiviti antifouling mereka untuk mengelakkan biofouling pada permukaan marin.



Pemantauan Alam Sekitar

Bioteknologi marin juga menyumbang kepada pemantauan alam sekitar melalui penggunaan **biomarker** and **biosensor**:

- **Bioindikator:** Organisma marin seperti kerang (*Mytilus edulis*) digunakan sebagai **bioindikator** untuk memantau pencemaran logam berat dan menilai pendedahan kepada bahan pencemar alam sekitar.
- **Biomarker Enzimatik:**
 - **Enzim Biotransformasi:** Kajian menyiasat enzim biotransformasi (fasa I dan II) dan protein tekanan (cth, protein kejutan haba-70) sebagai biomarker. Sebagai contoh, corak fosforilasi MAPK dalam kerang boleh menunjukkan pendedahan kepada bahan pencemar yang berbeza.
 - **Enzim Antioksidan:** Perubahan dalam aktiviti enzim antioksidan (cth, katalase, superoksida dismutase, glutathione peroksidase) dalam organisma seperti kerang dan ikan dinilai sebagai tindak balas kepada pencemaran petrokimia atau pendedahan logam.
 - **Anhidrase Karbonik:** Enzim logam ini juga dibincangkan kerana potensinya sebagai biomarker baru dalam pemantauan alam sekitar dan pembangunan biosensor untuk logam.
- **Kajian Transkriptomik:** Perbezaan transkriptomik dalam hati ikan yang terdedah kepada kalis api disiasat untuk menilai tindak balas molekul terhadap pencemaran.
- **Pengajian Bioinformatik:** Pendekatan bioinformatik digunakan untuk mengkaji kesan pencemaran logam pada enzim organisma air laut, memberikan pandangan tentang peranan fisiologi.
- **Biosensor:** Bioteknologi marin menyokong pembangunan biosensor untuk mengukur perubahan dalam keadaan persekitaran, termasuk ekosistem biologi dan mikrob.





Kosmetik: Produk Anti-penuaan dan Penjagaan Kulit

Sebagai contoh: ALGOTHERM (Perancis) – Bioteknologi Biru

- **Sumber:** Alga marin dan rumpai laut
- **Produk:** Krim dan serum anti-penuaan yang diperkaya dengan kolagen marin dan polisakarida
- **Penambahan Nilai:** Bahan aktif berasaskan marin menyediakan antioksidan dan penghidratan semula jadi dengan kaedah penuaian yang mampan. Produk ini memenuhi permintaan yang semakin meningkat untuk penyelesaian penjagaan kulit semula jadi, berkesan dan mementingkan alam sekitar.

Makanan Berfungsi dan Nutraseutikal

Sebagai contoh: Astaxanthin daripada *Haematococcus pluvialis* atau mikroalga marin

- **Sumber:** Mikroalga marin yang ditanam
- **Produk:** Suplemen pemakanan dengan sifat antioksidan dan anti-radang
- **Penambahan Nilai:** Sebatian terbitan marin semulajadi dengan nilai kesihatan yang tinggi, dipasarkan untuk sokongan kardiovaskular dan sistem imun.



Farmaseutikal: Ejen antivirus dan analgesik

Sebagai contoh: Ziconotide (Prialt®) oleh Elan Pharmaceuticals

- **Sumber:** Racun siput kon (*Conus magus*)
- **Produk:** Analgesik bukan opioid untuk kesakitan kronik yang teruk
- **Penambahan Nilai:** Menawarkan alternatif kepada opioid tradisional, dengan kekhususan yang tinggi dan mengurangkan risiko ketagihan, mempamerkan organisma marin sebagai sumber sebatian ubat baru.



Bahan Bioperubatan: Kolagen dan Kitosan

Sebagai contoh: Pembalut luka yang berasal dari marin

Sumber: Kulit ikan, obor-obor, dan cengkerang krustasea

- **Produk:** Bahan penyembuhan luka biokompatibel dan perancah untuk kejuruteraan tisu
- **Penambahan Nilai:** Kolagen marin dan kitosan boleh terbiodegradasi, menggalakkan penyembuhan, dan berfungsi sebagai alternatif mampan kepada biomaterial sintetik.

Industri Makanan: Enzim Marin untuk Pemprosesan

Sebagai contoh: Protease dan lipase daripada bakteria laut dalam

- **Sumber:** Mikroorganisma marin
- **Produk:** Digunakan dalam hidrolisis protein dalam pemprosesan makanan (cth, sos ikan, tenusu)
- **Penambahan Nilai:** Kecekapan yang dipertingkatkan dalam keadaan pemprosesan yang melampau (suhu, kemasinan, pH), menawarkan alternatif yang menjimatkan kos dan mampan kepada proses kimia.

Bioteknologi Industri: Bioplastik dan Biofuel

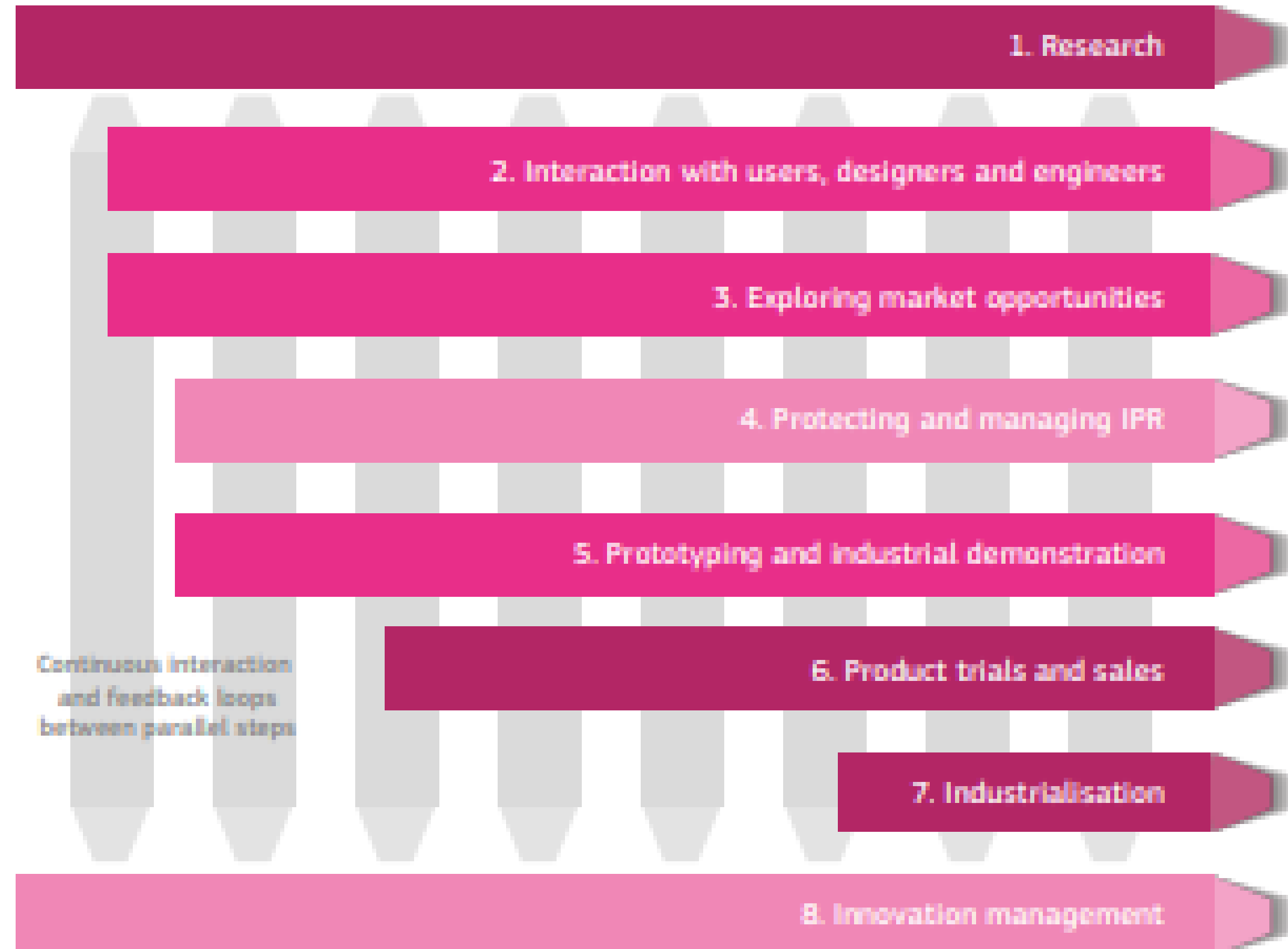
Sebagai contoh: Pengeluaran PHA (polyhydroxyalkanoates) oleh bakteria marin

- **Sumber:** Mikroorganisma marin
- **Produk:** Plastik terbiodegradasi
- **Penambahan Nilai:** Alternatif mesra alam kepada plastik berasaskan petroleum, dengan potensi untuk penskalaan menggunakan biojisim marin atau produk sampingan.

- **Sebagai contoh:** *Biomaterials* dari *Chitosan* dibangunkan oleh penyelidik Indonesia (cth, Universiti IPB, UI)
- **Sumber:** Cengkerang udang dan ketam (hasil sampingan industri makanan laut)
- **Produk:** Pembalut luka berasaskan kitosan, filem penghantaran ubat, dan salutan antimikrob
- **Penambahan Nilai:** Menukar sisa daripada pemprosesan makanan marin kepada produk bioperubatan bernilai tinggi dengan aplikasi di klinik dan hospital.



Penyelidikan Translasi



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).

Trincon, 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**

Dibiayai oleh Kesatuan Eropah. Walau bagaimanapun, pandangan dan pendapat yang dinyatakan adalah pandangan pengarang sahaja dan tidak semestinya mencerminkan pandangan Kesatuan Eropah atau Agensi Eksekutif Pendidikan dan Kebudayaan Eropah (EACEA). Kesatuan Eropah mahupun EACEA tidak boleh dipertanggungjawabkan ke atas mereka.

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

