

## MEMPERKASA BIOREMEDIASI: INOVASI BAKTERI HIDROKARBONOKLASTIK DALAM MENYELAMATKAN LINGKUNGAN BERAIR

### *ENRICHING BIOREMEDIATION: HYDROCARBONOCLASTIC BACTERIAL INNOVATION IN SALVAGING AQUEOUS ENVIRONMENTS*

Vitasari<sup>1,\*</sup>, Agung Dhamar Syakti<sup>1</sup>, Nancy Willian<sup>1</sup>, Lily Viruly<sup>1</sup>, Febrianti Lestari<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Maritim Raja Ali Haji,  
Jalan Politeknik Senggarang, Kota Tanjungpinang, 29111, Kepulauan Riau, Indonesia

\*e-mail korespondensi: [vsari707@gmail.com](mailto:vsari707@gmail.com)

#### Abstrak

Senyawa hidrokarbon yang terkandung di dalam minyak bumi sangat berbahaya jika masuk dan mencemari perairan laut. Perlu dilakukannya pendekatan yang dapat menanggulangi terjadinya pencemaran minyak bumi di perairan laut. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah pendekatan secara biologis dengan bioremediasi. menggunakan bantuan bakteri hidrokarbonoklastik yang dapat mengikat, mengemulsi, mentranspor serta menguraikan bahan cemar. Riview literatur ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis bakteri hidrokarbonoklastik dari perairan Indonesia. Beberapa jenis bakteri hidrokarbonoklastik yang ditemukan dalam penelitian bioremediasi 10 tahun terakhir (2012-2022) dalam website <https://scholar.google.com> adalah *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Alcanivorax*, *Halomonas*, *Raoultella*, *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes*, *Vibrio alginolyticus*, *Alcaligenes*, *Micrococcus*, *Halobacillus* serta *Rhodobacteraceae*. Bakteri - bakteri ini terbukti dapat mendegradasi cemar minyak bumi di perairan laut baik secara tunggal maupun konsorsium dengan persentase kemampuan degradasi sebesar 22,2% - 100%. Dengan memanfaatkan bakteri-bakteri ini secara optimal, dapat membuka peluang untuk pengembangan strategi bioremediasi yang lebih efektif.

**Kata kunci:** Tumpahan Minyak, Konsorsium, Minyak Bumi

#### Abstract

Hydrocarbon compounds contained in petroleum are very dangerous if they enter and pollute sea waters. It is necessary to do an approach that can overcome the occurrence of petroleum pollution in marine waters. One approach that can be used is a biological approach, because this technique is more environmentally friendly and much cheaper. The biological approach can be done with bioremediation. The bioremediation process takes place with the help of hydrocarbonoclastic bacteria that can bind, emulsify, transport and decompose contaminants. This literature review aims to identify the types of hydrocarbonoclastic bacteria from Indonesian waters. Some types of hydrocarbonoclastic bacteria found used in bioremediation research for the last 10 years (2012 – 2022) on the website <https://scholar.google.com> are *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Alcanivorax*, *Halomonas*, *Raoultella*, *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes*, *Vibrio alginolyticus*, *Alcaligenes*, *Micrococcus*, *Halobacillus* and *Rhodobacteraceae*. These bacteria are proven to be able to degrade petroleum contaminants in marine waters either singly or in a consortium with a degradation capacity of 22.2% - 100%. By optimally utilizing these bacteria, it can open up opportunities for the development of more effective bioremediation strategies.

**Keywords:** Oil Spill, Consortium, Petroleum

#### PENDAHULUAN

Hidrokarbon merupakan senyawa yang dibentuk oleh dua unsur, yaitu unsur Hidrogen (H) dan unsur Karbon (C) (Sardjono, n.d.). Saat ini, hidrokarbon menjadi salah satu sumber energi yang banyak digunakan oleh manusia, sehingga keberadaannya menjadi sangat penting.

Salah satunya adalah hidrokarbon yang terkandung di dalam minyak bumi. Data pada tahun 2019 menyebutkan bahwa di Indonesia sekitar 51,5 % masih mendominasi penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi (energi dan Sumber Daya mineral (eSDm), 2019). Penggunaan bahan bakar ini meningkat mulai

dari sektor rumah tangga, komersial hingga sektor industri, sehingga meningkatkan pengeboran minyak bumi untuk memenuhi kebutuhan tersebut (Kuncowati, 2010). Dimana, aktivitas pengeboran ini dapat menjadi potensi pencemaran minyak bumi di perairan laut (Sulistiyono, 2013).

Selain itu kasus pencemaran minyak bumi di perairan laut dapat disebabkan oleh adanya aktivitas transportasi kapal, pencucian kapal, kecelakaan kapal ataupun karena pemeliharaan bangunan yang berada di laut (Khozanah, 2018). Menurut (Sulistiyono, 2012) penyebab paling utama terjadinya pencemaran minyak bumi di perairan laut adalah tumpahan minyak yang bersumber dari proses kapal, pengeboran minyak bumi lepas pantai ataupun karena terjadinya kecelakaan kapal. Kasus-kasus kecelakaan kapal yang menyumbang beban cemaran minyak bumi ke perairan laut diantaranya terjadi pada tahun 2017, kecelakaan kapal yang menumpahkan minyak bumi sebanyak 300 ton akibat tabrakan antara MT APL Denver dan MT Wan Hai 301. Selain itu pada 2 tahun sebelumnya (2015), sebanyak 4.500 MT minyak mentah masuk ke perairan laut akibat tabrakan Kapal MV Sinar Kapuas dan MT Alyarmouk (KKP).

Tumpahan minyak yang masuk dan mencemari perairan laut tidak dapat larut dengan air dan akan terapung di atas air sehingga menjadi penyebab terhalangnya penetrasi sinar matahari ke dalam laut serta dapat mengurangi kelarutan oksigen di dalam air sehingga dapat mengakibatkan kematian total (*catastrophic*) biota yang hidup di dalam perairan laut (Nugroho, 2007). Selain itu beberapa penyusun minyak yang masuk ke perairan laut dapat tenggelam dan lama-kelamaan akan terakumulasi pada proses sedimentasi sebagai suatu komponen hitam di dasar perairan laut (Mukhtasor, 2006), sehingga dapat menjadi toksik atau terakumulasi pada biota yang hidup dan mencari makan pada substrat (*deposit feeder*).

Selain bersifat toksik, beberapa senyawa dalam limbah minyak bumi dapat bersifat karsinogenik diantaranya adalah naphthalene, phenanthren dan anthrasen. Senyawa yang bersifat toksik dan karsinogenik tersebut dapat menjadi penyebab keracunan ataupun dalam jangka panjang dapat terakumulasi pada senyawa protein dan lemak dalam tubuh biota laut. Hal tersebut dapat mengakibatkan pelarutan membran sel biota yang disusun oleh lapisan protein dan lemak tersebut (Misran, 2002).

Selain akibat fatal pada biota hingga kematian, pencemaran minyak bumi yang masuk ke perairan laut juga dapat menjadi penyebab terjadinya perubahan perilaku dan reproduksi biota, migrasi ikan yang disebabkan oleh *tainting* (bau lantung) serta kematian masal plankton. Kerusakan ekosistem perairan laut yang terjadi akibat pencemaran minyak bumi juga dapat mengakibatkan menurunnya hasil budidaya perikanan dan tidak berlangsungnya aktivitas wisata pesisir dan pelabuhan (Kementrian Lingkungan Hidup, 2014). Adanya unsur hidrokarbon poliaromatik (PAH) menjadi penyebab senyawa ini memiliki sifat karsinogenik, toksik hingga mutagenik.

Oleh karena itu diperlukannya pendekatan-pendekatan yang dapat menurunkan dampak dari terjadinya pencemaran minyak bumi di perairan laut. Menurut (Atlas, 1981) terdapat 3 pendekatan yang dapat digunakan dalam mengatasi cemaran minyak bumi di perairan laut, yaitu secara fisika, kimia dan biologis. Pengelolaan secara fisika dan kimia telah berkembang sejak lama dan banyak digunakan dalam penanganan pencemaran minyak bumi di perairan laut Indonesia. Namun, kedua pendekatan ini lebih cocok digunakan pada tahap awal terjadinya tumpahan dan sangat jarang keberhasilannya dalam menuntaskan pembersihan tumpahan minyak secara menyeluruh. Setelah terjadinya tumpahan minyak, pendekatan mekanis hanya dapat menyelesaikan kejadian sekitar 10 - 15% saja (*Office of Technology Assessment*, 1990). Pendekatan secara biologi dapat digunakan sebagai upaya pemulihan cemaran minyak bumi di perairan laut Indonesia, karena teknik ini lebih ramah lingkungan dan jauh lebih rendah dari segi biayanya (Atlas, 1995). Pendekatan biologis dengan bioremediasi dapat dilakukan dalam pemulihan ekosistem laut yang tercemar oleh minyak bumi.

Bioremediasi merupakan teknik biologis pemulihan lingkungan dengan menggunakan mikroba. Bakteri hidrokarbonoklastik merupakan kelompok bakteri yang dapat menguraikan senyawa hidrokarbon yang terdapat di dalam minyak bumi secara alami. Dalam prosesnya bakteri hidrokarbonoklastik ini mengikat, mengemulsi, mentranspor serta menguraikan cemaran minyak bumi di perairan laut (Prakasita & Wulansarie, 2018). Pemecahan senyawa organik yang dilakukan oleh mikroorganisme menjadikan senyawa ini menjadi bahan yang

lebih sederhana seperti karbondioksida, air ataupun metana (Oetomo, 2015).

Menurut (Lasari, 2010) beberapa bakteri yang tersebar di sedimen atau perairan yang termasuk kedalam golongan bakteri hidrokarbonoklastik diantaranya adalah *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Brevibacterium*, *Alcaligenes*, *Arthrobacter* dan *Pseudomonas*. Selain terdapat di ekosistem yang tercemar, bakteri ini juga dapat diambil dari ekosistem tercemar lainnya melalui proses isolat dan diterapkan pada ekosistem tujuan bioremediasi (Vidali, 2011). Mengidentifikasi bakteri hidrokarbonoklastik yang tersebar di perairan laut Indonesia adalah langkah krusial dalam upaya bioremediasi. Mengetahui beragam spesies bakteri yang ada dapat membantu dalam pemilihan bakteri yang paling efektif untuk mengatasi jenis pencemar tertentu, serta memperkaya pengetahuan tentang keragaman hayati di lingkungan laut Indonesia. Dalam tulisan ini akan memaparkan beberapa jenis bakteri hidrokarbonoklastik yang digunakan dalam penelitian 10 tahun terakhir (2012-2022) yang bersumber dari website <https://scholar.google.com> dengan dilakukan penyaringan hanya pada pengaplikasian di media perairan yang bersalinitas yaitu perairan laut. Dengan memperluas pengetahuan tentang berbagai jenis bakteri hidrokarbonoklastik yang ada, strategi bioremediasi dapat dikembangkan lebih efektif melalui penggabungan dalam konsorsium atau isolasi spesies dengan kemampuan degradasi yang unik, mempercepat pemulihan lingkungan tercemar dan meningkatkan kesadaran akan pentingnya keragaman mikroba dalam menjaga keseimbangan ekosistem laut. Harapannya, tulisan ini dapat menjadi bahan informasi dan pembanding untuk para akademisi dan peneliti khususnya dalam bidang bioremediasi untuk dapat mengembangkan penelitian mengenai bakteri hidrokarbonoklastik yang dapat mendegradasi minyak bumi yang mencemari perairan laut Indonesia.

## METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penulisan ini adalah *studi literature*, dimana hasil penelitian terdahulu khususnya pada 10 tahun terakhir (2012-2022) website <https://scholar.google.com> dengan keyword Jenis Bakteri Hidrokarbonoklastik untuk *Oil Spill*, kemudian dilakukan penyaringan pada penelitian yang menggunakan media bersalinitas (air laut). Penelitian yang dijadikan *literature* dalam tulisan

ini adalah yang dilakukan oleh Risdiyanto et al. (2013), Bhaktinagara et al. (2015), Prakasita & Wulansarie (2018), Nurjanah (2018), Wayoi (2018), Puspitasari et al. (2020), Syafrizal et al. (2020), Afianti & Febrian (2020), Prakoso (2020), Irene et al. (2020), Titah et al. (2021), Ibrohim (2021) dan Ayatillah et al. (2022).

Data jenis agen bakteri hidrokarbonoklastik yang diperoleh kemudian dianalisis keberhasilannya dalam mendegradasi ditinjau dari seberapa besar kemampuannya dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon yang terkandung di dalam minyak bumi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukannya penyaringan terhadap penelitian-penelitian terdahulu, didapatkan 13 jurnal penelitian yang terbit dalam rentang waktu 2012 – 2022. Jumlah penelitian bioremediasi dengan berbagai jenis bakteri hidrokarbonoklastik baik yang secara tunggal ataupun yang secara konsorsium pada setiap tahunnya dapat dilihat pada Gambar 1. Berikut ini.



Gambar 1. Jumlah Penelitian Bioremediasi Tahun 2012 - 2022

Dari data yang ditampilkan pada Gambar 1, diketahui bahwa tidak ada penelitian bioremediasi yang diaplikasikan pada media perairan bersalinitas (air laut) pada website <https://scholar.google.com> pada tahun 2012, 2014, 2016 dan 2017. Penelitian pada tahun 2013, 2015 dan 2022 berjumlah 1 penelitian, 2 penelitian pada tahun 2021, 3 penelitian pada tahun 2018 dan 5 penelitian pada tahun 2020. Sehingga penelitian mengenai bioremediasi dengan bakteri hidrokarbonoklastik pada website <https://scholar.google.com> paling banyak dilakukan pada tahun 2020 dengan jumlah 5 penelitian. Untuk jenis bakteri hidrokarbonoklastik yang digunakan pada penelitian dalam 10 tahun terakhir tersebut dapat dilihat dalam Tabel 1. Berikut ini.

Tabel 1. Jenis Bakteri Hidrokarbonoklastik yang digunakan sebagai Agen Remediasi dalam 10 Tahun Terakhir (2012 - 2022)

No.	Bakteri	Jenis	Bahan Pencemar	Durasi Degradasi	Keterangan	Kemampuan Degradasi	Sumber
	<u>Bacilluslicheniformis</u>						
	<u>Pseudomonasluteola</u>						
2.	<i>Bacillus cereus</i>	Tunggal	Minyak Mentah	15 hari	<i>Bacillus cereus</i> yang diisolasi dari lingkungan non-salin untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon dalam minyak mentah pada kondisi salinitas	24,9%	Bhaktinagara <i>et al.</i> (2015)
3.	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Tunggal	Limbah Minyak	21 hari	Konsentrasi bakteri sebanyak 3% pada media teraerasi dan konsentrasi cemaran minyak 1.000 ppm	100%	Prakasita & Wulansarie (2018)
	<u>Pseudomonas</u>					91,94%	
	<u>Bacillus</u>					89,99%	
	<u>Klebsiella</u>						
	<u>Enterobacter</u>						
	<u>Citrobacter</u>						
	<u>Pseudomonas</u>						
	<u>Bacillus</u>						
5.	<i>Pseudomonas Aeruginosa</i>	Tunggal	Minyak Bumi	4 hari	Dengan perlakuan <i>shaker</i>	95,37%	Wayoi (2018)
	<i>Alcanivorax nanhaiticus</i>	Tunggal				54%	Puspitasari <i>et al.</i> (2020)
	<i>Halomonas meridian</i>	Tunggal				72%	
	<u>Raoultella sp</u>						
	<u>Pseudomonas sp</u>						
	<u>Enterobacter sp</u>				Pada media AF (Air terformasi)	38,80%	
	<u>Alphaproteobacteria</u>						
	<u>Firmicutes</u>						
9.	<i>Vibrio alginolyticus</i>	Tunggal	Solar	14 hari	Isolat bakteri hidrokarbonoklastik dari sedimen Pelabuhan Tanjung Mas Semarang	80,85%	Prakoso (2020)
	<u>Alcaligenes</u>						
	<u>Bacillus</u>						
	<u>Bacillus subtilis</u>						
	<u>Pseudomonas putida</u>						

	dengan metode gores yang diaplikasikan pada air laut buatan
<i>Bacillus</i>	74,71%
<i>Micrococcus</i>	73,68%
<i>Enterobacter</i>	73,39%
<i>Klebsiella</i>	74,14%
<i>Pseudomonas</i>	74,43%
<i>Bacillus aquimaris</i>	
<i>B. megaterium</i>	
<i>B. pumilus</i>	
<i>Halobacillus trueperi</i>	
<i>Rhodobacteraceae</i> <i>bacterium</i>	

Sumber : Website <https://scholar.google.com> dengan *Keyword* Jenis Bakteri Hidrokarbonoklastik untuk *Oil Spill*

Keterangan: - : Tidak Menyebutkan

Berdasarkan data yang ditampilkan pada Tabel 1. tentang jenis - jenis bakteri hidrokarbonoklastik yang digunakan pada penelitian bioremediasi dalam 10 tahun terakhir (2012 – 2022) menunjukkan jenis yang berbeda – beda pula, diantaranya adalah *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Alcanivorax*, *Halomonas*, *Raoultella*, *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes*, *Vibrio alginolyticus*, *Alcaligenes*, *Micrococcus*, *Halobacillus* serta *Rhodobacteraceae*. Bakteri – bakteri hidrokarbonoklastik ini didapati dari isolasi sampel yang tercemar oleh hidrokarbon (minyak bumi). Jenis senyawa yang mengandung hidrokarbon yang menjadi bahan pencemar juga berbeda – beda seperti minyak mentah, solar hingga yang telah menjadi limbah.

Durasi yang digunakan dalam pendegradasian berbeda – beda dalam penelitian – penelitian tersebut, dimana berlangsung dalam rentang waktu 7 hari hingga durasi terlama yaitu 42 hari. Besarnya kemampuan mendegradasi bakteri – bakteri hidrokarbonoklastik tersebut juga mendapati perbedaan mulai dari 21% hingga mencapai 100%. Perbedaan kemampuan degradasi dari berbagai jenis bakteri hidrokarbonoklastik ini juga dapat disebabkan oleh perbedaan faktor – faktor penting yang mempengaruhi proses bioremediasi.

Faktor - faktor penting yang perlu menjadi perhatian pada kemampuan bakteri hidrokarbonoklastik dalam mendegradasi minyak bumi adalah ketepatan suhu dan nutrisi serta tingkat salinitas, pH dan oksigen di lingkungan. Keasaman serta tingkat salinitas lingkungan akan menjadi penentu jenis bakteri apa yang dapat digunakan. Kontrol oksigen juga menjadi kebutuhan karena dalam proses degradasi bahan pencemar, penggunaan molekul hidrokarbon sebagai sumber karbon untuk melakukan metabolisme sel oleh bakteri melibatkan enzim oksigenase. Proses bioremediasi akan menjadi lebih optimal ketika lingkungan berada pada kondisi aerobik. Ketidak tersedianya oksigen akan mengakibatkan ketidaksempurnaan dalam proses degradasi (*United States Environmental Protection Agency* (US EPA), 2012). Selain itu jenis dan besarnya konsentrasi bahan pencemar juga menjadi bagian penting, karena hal tersebut menjadi pengaruh kekompleksan bahan pencemar (hidrokarbon).

Penelitian oleh Risdianto *et al.* (2013) menemukan pada sedimen muara sungai Donan

Cilacap yang tercemar minyak bumi sebanyak 20 isolat bakteri, dengan isolat terbaik sebanyak 3 isolat yaitu dari genus *Pseudomonas* dan *Bacillus* dengan hasil seleksi *Bacilluscoagulans*, *Bacilluslicheniformis* dan *Pseudomonasluteola* dengan kemampuan degradasi terbesar pada konsorsium *Bacilluslicheniformis* dan *Pseudomonasluteola* sebesar 65,63%. Bhaktinagara *et al.* (2015) menemukan kemampuan degradasi tertinggi sebesar 24,9% dalam inkubasi 15 hari dilakukan oleh bakteri *Bacillus cereus* secara tunggal dalam media bersalinitas 0,3 ‰. Pada penelitian Prakasita & Wulansarie (2018) menemukan kemampuan degradasi sebesar 100% dengan kondisi aerasi oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa* 3% pada konsentrasi minyak 1.000 ppm.

Penelitian oleh Nurjanah (2018) menemukan 7 isolat dari perairan Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya yang dapat mendegradasi minyak solar, dan menemukan kemampuan tertinggi pada konsorsium 5 isolat (*Citrobacter*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*, *Klebsiella* dan *Bacillus*) sebesar 94,57%. Kemampuan degradasi sebesar 91,94% dan 89,99% didapatkan dari degradasi oleh *Pseudomonas* dan *Bacillus* masing – masing secara tunggal. Wayoi (2018) melakukan penelitian bioremediasi dengan perlakuan *shaker* menemukan hasil yang lebih efektif sebesar 95,37% dari pada perlakuan diam sebesar 80,007% oleh bakteri *Pseudomonas aeruginosa* dalam durasi 4 hari.

Puspitasari *et al.* (2020) berhasil mengisolasi bakteri unggul yang diambil dari air laut Pelabuhan Tanjung Mas, yang secara tunggal dalam waktu 14 hari dapat mendegradasi solar dengan konsentrasi 2%, 5% dan 10% dengan kemampuan degradasi sebesar 54% dan 72% berturut - turut oleh bakteri *Alcanivorax nanhaiticus* dan *Halomonas meridian*. Penelitian oleh Afianti & Febrian (2020) membuktikan dalam uji degradasi secara *in vitro* bahwa konsorsium bakteri yang di isolasi dari sedimen mangrove *Xylocarpus granatum* di Bintan mampu mendegradasi pencemar minyak sebesar 52,9% oleh bakteri *Alphaproteobacteria* dan *Firmicutes*.

Prakoso (2020) mengungkapkan bahwa pencemar solar dari aktivitas Pelabuhan Tanjung Mas Semarang dapat didegradasi oleh bantuan bakteri hidrokarbonoklastik, karena peneliti berhasil mengisolasi 2 isolat (*Vibrio*

*alginolyticus*) yang memiliki kemampuan 19,15% - 80,85% untuk mendegradasi 5% dan 10% solar selama 7 hari - 14 hari, yang diambil dari sedimen di Pelabuhan Tanjung Mas Semarang. Enam isolat ditemukan oleh Irene *et al.* (2020) dari substrat mangrove yang berpotensi mendegradasi minyak bumi dengan karakteristik tanah yang berbeda. Pada tanah mangrove berpasir ditemukan 5 isolat (genus *Alkaligenes*), pada tanah mangrove berlumpur ditemukan *Pseudomonas* dan *Bacillus* dan pada tanah mangrove tanah liat ditemukan 2 genus yaitu bakteri *Bacillus* dan *Alcaligenes*, dengan proporsi keberadaan bakteri tertinggi sebesar 58,51% pada tanah liat. Irene juga mengungkapkan bahwa perbedaan tekstur tanah mempengaruhi keberadaan bakteri hidrokarbonoklastik.

Titah *et al.* (2021) dalam penelitiannya mengungkapkan bahwa bakteri *B. subtilis* dan *P.putida* berpotensi besar menjadi agen bioremediasi air laut yang tercemar oleh minyak mentah karena terbukti berhasil mendegradasi konsentrasi sebesar 3,172 mg/L menjadi 1,069 mg/L (kemampuan degradasi 66,29%) dalam kurun waktu 35 hari dengan kadar salinitas sebesar 35‰ menggunakan metode *sequence* 5%. Penelitian yang dilakukan oleh Ibrohim (2021) menemukan bahwa isolat yang diisolasi dari air laut di Pantai Sendangbiru, Malang pada media cair dapat merubah viskositas solar, perubahan warna, kekeruhan media cair ataupun perubahan lainnya. Lima isolat yang ditemui dapat mendegradasi hingga 89% oleh genus *Bacillus*, 79% oleh genus *Pseudomonas*, 74% genus *Klebsiella*, 67% oleh genus *Micrococcus* dan sebesar 61% oleh genus *Enterobacter*.

Ayatillah *et al.* (2022) melakukan penelitian untuk mengetahui kemampuan daun ketapang (*T.catappa*) yang dijadikan substrat sediaan kering konsorsium bakteri hidrokarbonoklastik (*Bacillus aquimaris*, *B. Megaterium*, *B. Pumilus*, *Halobacillus trueperi* dan *Rhodobacteraceae bacterium*). Hasil penelitian mendapati bahwa konsorsium tersebut dapat mendegradasi limbah minyak dengan kemampuan degradasi sebesar 22,2% - 55,3%. Genus *Pseudomonas* dan *Bacillus* menjadi jenis bakteri yang mendominasi dari penelitian 10 tahun terakhir ini, baik yang mendegradasi secara tunggal maupun secara konsorsium. Wardhani *et al.* (2020) dalam artikelnya menyebutkan bahwa *Pseudomonas putida* dan *Bacillus subtilis* yang

bekerja secara konsorsium bersama memiliki kemampuan degradasi sebesar 70% - 90% dengan durasi waktu degradasi selama 1-2 bulan bergantung dengan konsentrasi yang dimiliki oleh bahan pencemar. *Pseudomonas putida* dan *Bacillus subtilis* juga masih bisa hidup pada ekosistem yang tercemar oleh konsentrasi 15% minyak mentah.

Penggunaan bakteri yang bekerja secara konsorsium ditunjukkan karena komponen penyusun hidrokarbon yang terkandung di dalam minyak bumi memiliki kekomplekan sehingga dalam pendegradasiannya tidak cukup hanya dilakukan oleh satu bakteri saja. Hal tersebut dikarenakan ketika bakteri hidrokarbonoklastik mendegradasi seluruh komponen penyusun hidrokarbon, bakteri tersebut membutuhkan substrat yang spesifik, sehingga dibutuhkan bakteri lain (konsorsium) untuk mendegradasi penyusun bahan cemar yang kompleks. Menurut Aditiawati *et al.*, (2001) dalam bekerjasama, bakteri konsorsium ini memiliki dua pengaruh yaitu secara *sinergisme* (konsorsium dapat meningkatkan kemampuan degradasi) ataupun secara *antagonisme* (konsorsium dapat menurunkan kemampuan degradasi).

Simulasi konsorsium oleh *Raoultella sp*, *Pseudomonas sp* dan *Enterobacter sp* yang dilakukan oleh Syafrizal *et al.* (2020), mengungkapkan bahwa konsorsium bakteri tersebut untuk diaplikasikan pada skala lapangan akan jauh lebih baik jika dibandingkan dengan penggunaan salah satu bakteri saja yang didapatkan dari kultur murni. Konsorsium bakteri tersebut memiliki kekuatan yang lebih kuat serta mempunyai beragam proses metabolisme yang cocok dengan ekosistem alami (Tyagi *et al.*, 2011).

Wenti & Others, (2012) menjelaskan secara umum proses bioremediasi minyak bumi oleh bakteri hidrokarbonoklastik yaitu :

- 1) Cemar minyak pada lingkungan akan mengandung bakteri hidrokarbonoklastik secara alami
- 2) Hidrokarbon akan dijadikan sebagai sumber karbon dan energi oleh bakteri hidrokarbonoklastik.
- 3) Biosurfaktan yang dihasilkan oleh bakteri hidrokarbonoklastik akan melarutkan hidrokarbon (pada fase cair), pengurangan tegangan permukaan serta peningkatan

akseibilitas bakteri hidrokarbonoklastik dalam degradasi butiran minyak.

- 4) Melalui proses transpor aktif atau difusi atau juga interaksi sel (pada sel bakteri yang mengemulsi bahan cemar), terjadi transfer hidrokarbon ke dalam sel bakteri (Sumarsono, 2009).
- 5) Oksidasi atau pecahnya hidrokarbon oleh enzim akan menghasilkan asam sederhana dan aldehida yang nantinya dapat masuk ke sistem metabolisme (proses transpor electron dan siklus Krebs).
- 6) Pelepasan CO<sub>2</sub> serta akan terbentuknya FADH<sub>2</sub>, ATP dan NADH pada siklus kreb. Dimana FADH<sub>2</sub> dan NADH masuk pada proses transpor elektron dengan terbentuknya ATP dan H<sub>2</sub>O.

Dari hasil beberapa penelitian yang menggunakan beberapa jenis bakteri hidrokarbonoklastik untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon yang menjadi cemar diketahui bahwa bakteri – bakteri tersebut terbukti dapat di aplikasikan dalam teknologi penanggulangan cemar minyak di perairan laut dalam proses bioremediasi. Faktor penentu keberhasilan teknologi bioremediasi ini adalah menciptakan lingkungan yang paling baik untuk bakteri hidrokarbonoklastik optimal dalam bermetabolisme (Darmayati & Afianti, 2017).

Perairan laut Indonesia memiliki potensi besar dalam keragaman bakteri laut yang dapat mendegradasi senyawa hidrokarbon, ditambah perairan laut Indonesia yang rentan terhadap terjadinya cemar yang salah satunya diakibatkan oleh senyawa hidrokarbon. Selain itu, mendukungnya kondisi iklim Indonesia menjadi salah satu aspek keberhasilan dalam proses bioremediasi (Darmayati & Afianti, 2017). Oleh karena itu perlunya penelitian lebih lanjut sebagai pengembangan teknologi bioremediasi dari segi teknik dan agen bioremediasi (bakteri hidrokarbonoklastik) untuk menanggulangi cemar hidrokarbon di perairan laut Indonesia.

## KESIMPULAN

Tinjauan literatur ini menekankan pentingnya penggunaan agen bioremediasi, terutama bakteri hidrokarbonoklastik, seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Alcanivorax*, *Halomonas*, *Raoultella*, *Alphaproteobacteria*, *Firmicutes*, *Vibrio alginolyticus*, *Alcaligenes*,

*Micrococcus*, *Halobacillus* serta *Rhodobacteraceae*, dalam menangani pencemaran minyak bumi di perairan laut. Temuan menunjukkan bahwa bakteri-bakteri yang ditemukan di perairan Indonesia ini memiliki potensi untuk menjadi solusi efektif dalam mengurangi tingkat pencemaran, baik secara tunggal maupun dalam konsorsium, dengan tingkat kemampuan degradasi mencapai 22,2% hingga 100%. Namun, untuk memperkuat pendekatan bioremediasi ini, diperlukan penelitian lanjutan yang lebih mendalam untuk memahami interaksi antara bakteri dan lingkungan, serta pengembangan strategi yang lebih optimal. Penelitian masa depan juga harus mengarah pada identifikasi bakteri baru dan penerapan teknologi terkini, serta mempromosikan kolaborasi lintas disiplin untuk mencapai tujuan konservasi lingkungan laut yang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini memberikan panduan yang berharga bagi peneliti di masa depan dalam upaya mereka untuk melindungi dan memulihkan kesehatan ekosistem laut dari dampak pencemaran minyak bumi.

## DAFTAR RUJUKAN

- Aditiawati, Pingkan, & Astuti, D. I. (2001). Isolasi Bertahap Bakteri Pendegradasi Minyak Bumi dari Sumur Bangko. *Proceeding Simposium Nasional IATMI 2001 Yogyakarta*.
- Afianti, N. F., & Febrian, D. (2020). Potensi Degradasi Minyak oleh Konsorsium Bakteri dari Sedimen Mangrove Bintan. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 11(1), 725–729.
- Atlas, R. M. (1981). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons: an environmental prespective. *Microbiol*, 45, 180–209.
- Atlas, R. M. (1995). Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation. *Mar. Pollut. Bull.*, 31, 178–182.
- Ayatillah, N., Syakti, A. D., & Hatmanti, A. (2022). Valorisasi Daun Ketapang (*Terminalia catappa*) Sebagai Substrat Sediaan Kering Bakteri Hidrokarbonoklastik Pengurai Limbah Minyak. *Doctoral Dissertation, Universitas Maritim Raja Ali Haji*, 2–3.
- Bhaktinagara, R. A., Supriyadi, A., & Raharjo,

- B. (2015). Biodegradasi senyawa hidrokarbon oleh strain bacillus cereus (VIC) pada kondisi salinitas yang berbeda. *Jurnal Akademika Biologi*, 4(3), 62–71.
- Darmayati, Y., & Afianti, N. F. (2017). Penerapan dan Tingkat Efektivitas Teknik Bioremediasi untuk Perairan Pantai Tercemar Minyak. *Oseana*, XLII(4), 55–69.
- energi dan Sumber Daya mineral (eSDm). (2019). *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*. Jakarta: ESDM.
- Ibrohim, I. (2021). Uji biodegradasi minyak solar oleh bakteri hidrokarbonoklastik dari pantai sendangbiru Kabupaten Malang. *Doctoral Dissertation, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim*.
- Irene, D. S., Dirgayusa, I. G. N. P., & Puspitha, N. L. P. R. (2020). Identifikasi Bakteri yang Berpotensi Mendegradasi Hidrokarbon dari Substrat Mangrove dengan Tekstur Berpasir, Berlumpur, dan Tanah Liat. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 6(2), 175–184.
- Khozanah. (2018). *Panduan Analisis Pencemaran Kimia Organik di Laut*. Jakarta: LIPI Press.
- Kuncowati. (2010). Pengaruh pencemaran minyak di laut terhadap ekosistem laut. *Jurnal Aplikasi Pelayaran Dan Kepelabuhan*, 1(1), 18–22.
- Lasari, D. . (2010). *Bakteri, Pengolah Limbah Minyak Bumi yang Ramah lingkungan*. Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. www.esdm.go.id
- Misran, E. (2002). Aplikasi Teknologi Berbasis Membran dalam Bidang Bioteknologi Kelautan: Pengendalian Pencemaran. *Program Studi Teknik Kimia Universitas Sumatera Utara*.
- Mukhtasor. (2006). *Pencemaran Pesisir dan Laut*. Jakarta: PT Paradnya Paramita.
- Nugroho, A. (2007). Dinamika Populasi Konsorsium Bakteri Hidrokarbonoklastik: Studi Kasus Biodegradasi Hidrokarbon Minyak Bumi Skala Laboratorium. *Jurnal Ilmu Dasar*, 8(1).
- Nurjanah, I. (2018). Uji potensi bakteri pendegradasi minyak solar di perairan Pelabuhan Tanjung Perak Surabaya. *Doctoral Dissertation, UIN Sunan Ampel Surabaya*.
- Oetomo, D. (2015). Biodegradasi Minyak Bumi oleh Mikroba pada Media Air Laut dan Air Tawar. *Jurnal Bio-Pendidikan*, 4(1).
- Prakasita, I. G. F., & Wulansarie, R. (2018). Review Analisis Teknologi Degradasi Limbah Minyak Bumi untuk Mengurangi Pencemaran Air Laut di Indonesia. *Reka Buana Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 3(2), 80–86.
- Prakoso, B. E. (2020). *Bakteri Pendegradasi Solar Dari Sedimen Perairan Dalam Skala Laboratorium ( In Vitro )*. 9(4), 453–463.
- Puspitasari, I., Trianto, A., & Suprijanto, J. (2020). Eksplorasi Bakteri Pendegradasi Minyak dari Perairan Pelabuhan Tanjung Mas , Semarang. *Journal of Marine Research*, 9(3), 281–288. <https://doi.org/10.14710/jmr.v9i3.27606>
- Risdiyanto, Irianto, A., & Sastranegara, M. H. (2013). Biodegradasi petroleum menggunakan bakteri indigenous dari perairan muara Sungai Donan Cilacap. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah (Journal of Waste Management Technology)*, 16(Suplemen Edition), 23–24.
- Sardjono, R. E. (n.d.). *Konsep - Konsep Dasar Kimia Organik (PEKI4203/M)*.
- Sulistiyono, I. (2012). Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut Pada Kegiatan Industri Migas Dan Metode Penanggulangannya. *Forum Teknologi*, 3(1).
- Sulistiyono, S. (2013). Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut pada Kegiatan Industri Migas dan Metode Penanggulangan. *Ppsdmmigas*.
- Sumarsono, T. (2009). Efektivitas Jenis dan Konsentrasi Nutrien dalam Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Mentah yang Diaugmentasi dengan Konsorsium Bakteri. *Universitas Airlangga*.
- Syafrizal, Rahmaniar, R., Partono, T., Kristiawan, Z. O., Ardhyarini, N., Handayani, Y., & Rofiqoh. (2020). Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Minyak Bumi Menggunakan Aktifitas Konsorsium Sedimen Laut Dalam.

- Lembaran Publikasi Minyak Dan Gas Bumi*, 54 No. 2(Agustus), 81–91.
- Titah, H. S., Pratikno, H., Purwanti, I. F., & Wardhani, W. K. (2021). *Biodegradation of Crude Oil Spill Using Bacillus Subtilis and Pseudomonas Putida in Sequencing Method*. 22(11), 157–167.
- Tyagi, M., da Fonseca, M., & de Carvalho, C. (2011). Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, 22, 231–241.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2012). A Citizen’s Guide to Bioremediation. *EPA 542-F-12-003 September 2012*.
- Vidali, M. (2011). Bioremediation. *An Overview. Pure Appl. Chem.*, 73, 1163–1172.
- Wardhani, Titah, W. K., & Sulistyaning, H. (2020). Studi Literatur Alternatif Penanganan Tumpahan Minyak Mentah Menggunakan Bacillus subtilis dan Pseudomonas putida (Studi Kasus: Tumpahan Minyak Mentah Sumur YYA-1). *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), 97–102.  
<https://doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.52637>
- Wayoi, G. P. F. (2018). *Bioremediasi Air Laut Terkontaminasi Limbah Minyak Menggunakan Bakteri Pseudomonas aeruginosa*.
- Wenti, M. J. S., & Others. (2012). Biodegradasi Oil Sludge dengan Variasi Lama Waktu Inkubasi dan Jenis Konsorsium Bakteri 112 yang Diisolasi dari Lumpur Pantai Kenjera. *Universitas Airlangga*.