



Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Minyak Bumi Menggunakan Aktifitas Konsorsium Sedimen Laut Dalam

Syafrizal¹⁾, Restiya Rahmaniar²⁾, Tri Partono²⁾, Zulkifliani¹⁾, Onie Kristiawan¹⁾,
Novie Ardhyarini¹⁾, Yanny Handayani¹⁾, dan Rofiqoh¹⁾

¹⁾Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"
Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan 12230

²⁾Department of Marine Science and Technology, Faculty of Fisheries and Marine Science
Bogor Agricultural University, Bogor, Indonesia

Artikel Info:

Naskah Diterima:
27 April 2020
Diterima setelah
perbaikan:
11 Juni 2020
Disetujui terbit:
30 Agustus 2020

Kata Kunci:

Bakteri konsersium
biodegradasi
senyawa hidrokarbon
minyak bumi.

ABSTRAK

Tumpahan minyak bumi di laut semakin meningkat dengan peningkatan konsumsi minyak untuk industri, rumah tangga, komersial, transportasi dan lainnya. Potensi tumpahan minyak di laut diantaranya berasal dari kebocoran atau tumpahan ladang minyak bawah laut dan transportasi laut. Proses untuk penyelesaian tumpahan minyak dapat dilakukan secara fisika, kimia dan biologi. Proses biologi seperti bioremediasi menggunakan mikroorganisme untuk mendegradasi pencemar lingkungan. Bioremediasi merupakan metode yang aman dan efektif karena menggunakan mikroba yang secara alamiah sudah ada di lingkungan (tanah) dan tidak menggunakan atau menambahkan bahan kimia dalam prosesnya. Penelitian ini merupakan peningkatan skala dari penelitian laboratorium menggunakan media bervolume 8 liter berisi air laut yang tercemar tumpahan minyak untuk simulasi degradasi tumpahan minyak. Tujuan penelitian adalah menguji kemampuan bakteri konsorsium yaitu *Raoultella* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Enterobacter* sp. untuk simulasi degradasi minyak bumi. Variabel dari penelitian ini adalah variasi media yaitu *seawater nutrient broth (SWNB)* dan air terformasi (AF). Pengaruh komposisi media terhadap degradasi minyak bumi diamati selama tujuh hari. Media SWNB dan AF dengan bakteri konsorsium dapat mendegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi sebesar 49,35% dan 38,80%. Populasi bakteri meningkat dengan menurunnya konsentrasi minyak pada semua media. Kadar nutrient mempengaruhi pertumbuhan bakteri yang berhubungan dengan proses biodegradasi. Fraksi *saturated* lebih mudah terdegradasi dibandingkan fraksi *aromatic* berdasarkan analisa GCMS.

© LPMGB - 2020

PENDAHULUAN

Sumber energi di Indonesia masih didominasi penggunaan bahan bakar dari fosil seperti minyak bumi dan gas bumi sebesar 51,5 % pada tahun 2019. (Energi Sumber Daya Mineral, 2020) Bahan bakar ini digunakan di sektor industri, rumah tangga,

komersial, transportasi dan lainnya yang jumlahnya meningkat setiap tahun. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan permintaan minyak bumi setiap tahun untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar minyak dengan meningkatnya jumlah anjungan pengeboran minyak lepas pantai dan meningkatnya transportasi laut (Kuncowati, 2010). Disisi lain aktivitas tersebut berpotensi sebagai sumber tumpahan minyak di laut diantaranya berasal dari kebocoran atau tumpahan ladang minyak bawah laut, operasi kapal tanker, perawatan kapal (*docking*),

Korespondensi:

E-mail: syafrizal.1970@esdm.go.id (Syafrizal)
rizarreza421@gmail.com (Syafrizal)

terminal bongkar muat tengah laut, tangki *ballast* dan tangki bahan bakar, kecelakaan tanker (Sulistiyono, 2013).

Kasus tumpahan minyak yang terjadi di Indonesia, antara lain adalah kasus bocornya pipa Pertamina Cilacap (*King Fisher*) berdampak terbuangnya 600.000 barel minyak mentah pada tahun 2000, kasus Montara (75 hari) berdampak terbuangnya 400 barrel/hari pada tahun 2009, kasus tubrukan kapal MT Alyarmouk dengan Kapal MV Sinar Kapuas berdampak 4500 MT *crude oil* tumpah ke laut pada tahun 2015, kasus tubrukan MT Wan Hai 301 dengan MT APL Denver menyebabkan 300 ton minyak bumi terbuang pada tahun 2017, kasus tumpahan minyak Balikpapan yang menyebabkan 1.238.619 *barrel* terbuang pada tahun 2018 (KKP). Tumpahan minyak dapat berdampak kematian organisme, perubahan reproduksi dan tingkah laku organisme, dampak terhadap plankton, dampak terhadap ikan migrasi, bau lantung (*tainting*), dampak pada kegiatan perikanan budidaya dan kerusakan ekosistem (KKP). Kawasan wisata bahari dan pelabuhan juga terkena dampaknya hingga dapat menyebabkan aktivitasnya berhenti (Kementrian Lingkungan Hidup, 2014).

Penyebaran minyak di laut dipengaruhi kondisi tempat terjadi tumpahan minyak seperti angin, pasang surut, dan arus laut serta sifat-sifat minyaknya (Sabhan, dkk., 2014). Tumpahan minyak di laut akan mengalami fotooksidasi, evaporasi, emulsifikasi, disolusi, adsorpsi, sedimentasi, dan degradasi (French-McCay, 2004). Proses itu terjadi secara alami yang dipengaruhi oleh jumlah dan karakter minyak. Namun frekuensi tumpahan minyak yang berlebih menyebabkan beban pencemaran lingkungan lebih besar dibandingkan proses degradasi zat pencemar secara alamiah sehingga dibutuhkan bantuan manusia dengan teknologi yang ada untuk mengatasi pencemaran tersebut (Nugroho, 2010). Proses untuk penyelesaian tumpahan minyak dapat dilakukan secara fisika, kimia dan biologi. Proses fisika seperti penggunaan teknik pengumpulan dan *skimming* namun teknik ini berpotensi merusak biota laut. Proses kimia seperti penggunaan dispersan namun dapat menambah beban lingkungan karena pemakaian bahan kimia (Susanthi, dkk., 2009). Proses biologi seperti bioremediasi menggunakan mikroorganisme untuk mendegradasi pencemar lingkungan. Mikroorganismenya berupa bakteri alami yang berasal dari daerah yang tercemar maupun bakteri yang diisolasi dari daerah lain lalu diintroduksi ke daerah yang tercemar (Vidali, 2001). Bioremediasi merupakan metode yang aman dan

efektif karena menggunakan mikroba yang secara alamiah sudah ada dilingkungan (tanah) dan tidak menggunakan atau menambahkan bahan kimia dalam prosesnya. Lebih lanjut, *nutrient* untuk pertumbuhan mikroba menggunakan pupuk untuk kegiatan pertanian dan perkebunan.

Kelompok bakteri yang mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon disebut bakteri hidrokarbonoklastik. Secara alami, bakteri ini dapat mengikat, mengemulsi, mentranspor dan mendegradasi senyawa hidrokarbon (Prakasita & Wulansarie, 2018). Bakteri hidrokarbonoklastik di antaranya adalah *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Alcaligenes*, *Brevibacterium*, *Brevibacillus*, dan *Bacillus*. Bakteri-bakteri ini tersebar di alam seperti di dalam perairan atau sedimen tercemar minyak (Lasari, 2010).

Komposisi hidrokarbon dicemaran minyak bumi sangat kompleks sehingga tidak cukup hanya satu jenis bakteri untuk mendegradasinya. Setiap spesies bakteri membutuhkan substrat yang spesifik untuk mendegradasi keseluruhan komponen penyusun minyak bumi. Sehingga untuk sesuatu yang kompleks dibutuhkan konsorsium mikroba. Pada kultur campur (konsorsium) bakteri akan terjadi dua kemungkinan yang dapat berpengaruh pada proses bioremediasi yaitu sinergisme dan antagonisme. Menurut Aditiawati (2001) bahwa proses sinergisme (simbiosis mutualisme) bakteri kultur campur dapat meningkatkan proses bioremediasi dan sebaliknya jika antagonisme akan terjadi penurunan proses bioremediasi.

Aplikasi bioremediasi didunia yang pernah dilakukan seperti kecelakaan tanker Amoco Candiz pada tahun 1979 di lepas pantai Perancis, kecelakaan Exxon Valdez pada tahun 1989 di Alaska. Sedangkan aplikasi di Indonesia masih dalam tahap uji coba lapangan dan umumnya dicoba di darat (Darmayati, 2017).

Penelitian ini merupakan peningkatan skala dari penelitian Dwinovantyo (2015) dan modifikasi dari penelitian Cappello, dkk. (2006) dan Darmayati, dkk. (2015). Simulasi degradasi tumpahan minyak dilakukan menggunakan media bervolume 8 liter berisi air laut yang tercemar tumpahan minyak. Penelitian ini dilakukan di laboratorium PPPTMGB "LEMIGAS" dengan tujuan menguji kemampuan bakteri konsorsium yaitu *Raoultella* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Enterobacter* sp. untuk

simulasi degradasi minyak bumi. Variabel dari penelitian ini adalah variasi media yaitu *seawater nutrient broth (SWNB)* dan air terformasi (AF). Pengaruh komposisi media terhadap degradasi minyak bumi diamati selama tujuh hari.

BAHAN DAN METODE

Bahan Kimia

$n\text{-C}_6\text{H}_{14}$, Na_2SO_4 , akuades, Alkohol 96%, silika gel, alumina, CH_2Cl_2 , Test Kit Merck NH_4^+ (14752), NO_2^- (14776), NO_3^- (14556) dan PO_4^{3-} (14848), pupuk NPK 1000 ppm dan pupuk urea 200 ppm.

Sampel minyak bumi dari lapangan minyak di Riau. Nilai API dan berat jenis berturut-turut 42,85 dan 0,8116 g/cm³. Air laut dengan salinitas 31 psu.

Media

- Agar Miring. *Nutrient* agar diletakkan di dalam *incubator* dengan suhu 37°C.
- *Nutrient Broth* (NB). 1 g *beef extract*, 2 g ekstrak ragi, 5 g pepton, dan 5 g NaCl dalam 1 liter air (Parshetti, *et al.*, 2006).
- *Sea Water Nutrient Broth* (SWNB). 3 liter air laut, 250 ml molase cair, 1.26 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1 g KCl, 2.5 g KH_2PO_4 , 3.75 g Na_2HPO_4 , dan 1.29 g NaNO_3 (Okoro, 2010).
- Air terformasi (AF). Nitrogen : Fosfor = 5:1 dan ditambahkan pupuk urea 200 ppm sebagai sumber N dan pupuk NPK 1000 ppm sebagai sumber P di dalam 100 ml air laut.

Peralatan

Peralatan untuk simulasi digunakan bejana kaca (36 cm x 19 cm x 19 cm) dan pengaduk Heidolph RZR 2102 Control. Peralatan untuk analisa pH meter Boeco BT-600, fotometer MERCK SQ 118 Spectroquant, kolom kromatografi dan satu set GC Agilent 7890A dengan detektor Agilent Inert MSD 5975C dan kolom HP-5MS (panjang 60 m, diameter 0.250 mm, dan fase diam 0.25 μm).

Preparasi Bakteri Konsorsium

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini disterilisasi untuk mengurangi kontaminasi yang dapat mengganggu.

Preparasi bakteri meliputi isolate, kultivasi dan adaptasi. Secara singkat, isolate bakteri berdasarkan

Dwinovantyo (2015) dengan dikultur media agar miring. Bakteri berasal dari genus *Pseudomonas* sp., *Enterobacter* sp., dan *Raoultella* sp. Kultivasi di media NB steril. Hasil kultivasi masing-masing genus diambil 10 ml dan dimasukkan ke dalam 100 ml media NB untuk kultivasi konsorsium bakteri. Adaptasi dilakukan dengan dua media yaitu SWNB dan AF. Minyak 0,1 % v/v ditambahkan ke media tersebut kemudian dikocok dengan shaker pada suhu ruang. Jika populasi bakteri meningkat lebih dari 10⁶ CFU/ml maka bakteri dapat digunakan untuk proses biodegradasi (Okoro, 2010).

Uji Biodegradasi Minyak dan Analisa

Bakteri sebanyak 500 ml dimasukkan ke dalam media air laut pada bejana kaca kemudian ditambahkan minyak bumi sebanyak 2500 ppm. Media diaduk pada suhu 28-31°C (Dwinovantyo, 2015). Pengaruh perbedaan media yaitu media *SWNB*, media AF dan control menjadi variable dalam penelitian dengan waktu pengamatan pada hari 0, 3, 5, dan 7. Pada setiap waktu disampling 100 ml untuk dua kali ulangan (duplo) analisis konsentrasi minyak (SNI 06-6989.10: 2004), pH dan suhu (US EPA EQ-01-07: 2004), salinitas (Horiba U-10), populasi bakteri (OD_{600}) dan nutrient (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- dan PO_4^{3-}).

Fraksinasi dilakukan untuk memisahkan komponen *Saturated, Aromatik, Resin dan Asphaltelin* (SARA) dengan kromatografi kolom. Eluen yang ada kemudian diuapkan pelarutnya dan dipindahkan ke vial untuk Analisa lebih lanjut. Fraksi *saturated* dan *aromatic* dianalisa lebih lanjut menggunakan GCMS. Pengolahan data dilakukan menggunakan Microsoft Excel 2007.

HASIL DAN DISKUSI

Penelitian ini menggunakan bakteri konsorsium yang terdiri dari tiga bakteri yaitu *Raoultella* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Enterobacter* sp. Penggunaan bakteri konsorsium menurut perspektif aplikasi lapangan dalam simulasi ini lebih baik dari penggunaan kultur murni salah satu jenis bakteri karena konsorsium bakteri lebih kuat dan memiliki keragaman metabolisme yang dibutuhkan di lingkungan alami (Tyagi, dkk., 2011).

Ketiga bakteri tersebut memiliki kemampuan untuk mendegradasi minyak. Menurut Rodrigues, dkk., (2009), bakteri *Raoultella* sp. dapat mendegradasi senyawa aromatic seperti toluena, xilena, naftalena,

dan senyawa saturated seperti n-alkana. Bakteri *Enterobacter* sp juga memiliki kemampuan sebagai biosurfaktan dan efektif mendegradasi minyak pada pH 7 dan suhu 30°C (Ahmed, dkk., 2014). Menurut Dawson & Chang (1992) *Pseudomonas* sp. merupakan bakteri yang memiliki enzim spesifik dengan kemampuan biodegradasi terhadap senyawa hidrokarbon (Adzini, dkk., 2019).

Uji Biodegradasi

Pengamatan secara visual dilakukan selama proses uji biodegradasi. Pada hari ke 0, minyak menyebar di permukaan air Ketika dicampurkan dengan media. Hal ini diperlihatkan Gambar 1. Proses biodegradasi berjalan ditandai dengan bentuk minyak menjadi kecil dan air menjadi keruh. Hal ini diperlihatkan Gambar 2. Pada media SWNB,



Gambar 1
Uji biodegrasi minyak pada media SWNB dan media kontrol pada hari ke-0.



Gambar 2
Uji biodegradasi minyak pada media SWNB dan media control pada hari ke-7.

Tabel 1
Konsentrasi minyak (mg/l) pada media SWNB dan AF dengan bakteri dan media kontrolnya

Hari	SWNB	Kontrol SWNB	AF	Kontrol AF
0	1696	1533	1848	1456
3	1098	1521	1364	1445
5	1086	1488	1236	1419
7	859	1438	1131	1323

hal ini disebabkan oleh pertumbuhan bakteri dan campuran minyak. Pada media kontrol juga terjadi kekeruhan namun dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan media SWNB. Hal ini terjadi karena proses emulsifikasi. Kekeruhan hanya disebabkan oleh masukan minyak dalam media dan minyak tidak terurai menjadi butiran kecil, sehingga lebih banyak menetap di permukaan. Perubahan bentuk minyak menjadi butiran kecil disebabkan oleh emulsifikasi rhamnolipid yang berasal dari bakteri *genus Pseudomonas sp.* dalam proses degradasi. Bakteri menyebabkan emulsi minyak menjadi lebih stabil, sehingga minyak lebih mudah terdispersi dalam bentuk mikroskopis. Hal ini mempercepat dekomposisi minyak di perairan.

Proses biodegradasi menurunkan konsentrasi minyak pada media SWNB, AF dan control masing-masing media yang diperlihatkan Tabel 1. Konsentrasi minyak pada media SWNB dan AF

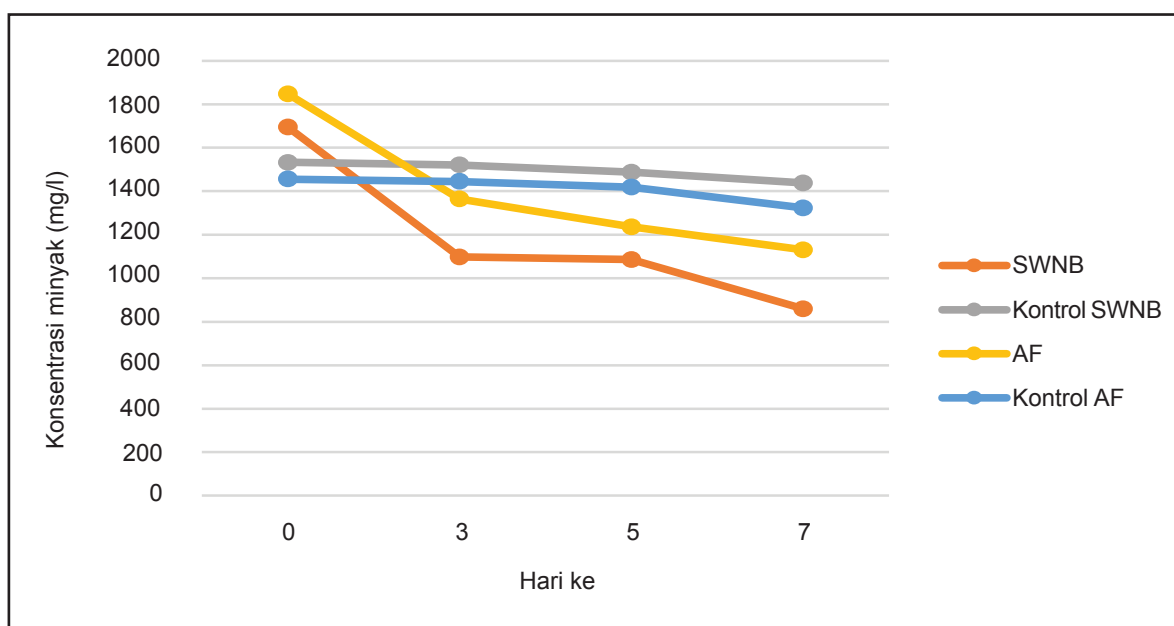
dengan bakteri menurun pada hari pengamatan. Pada hari ke 0 sebesar 1696 mg/l menurun menjadi 859 mg/l pada hari ke 7.

Penurunan konsentrasi minyak pada media kontrol disebabkan oleh pengaruh faktor fisik, seperti pengaruh pengadukan pada media dan suhu ruangan, yang menyebabkan proses *weathering* (Kurniawan & Effendi, 2014).

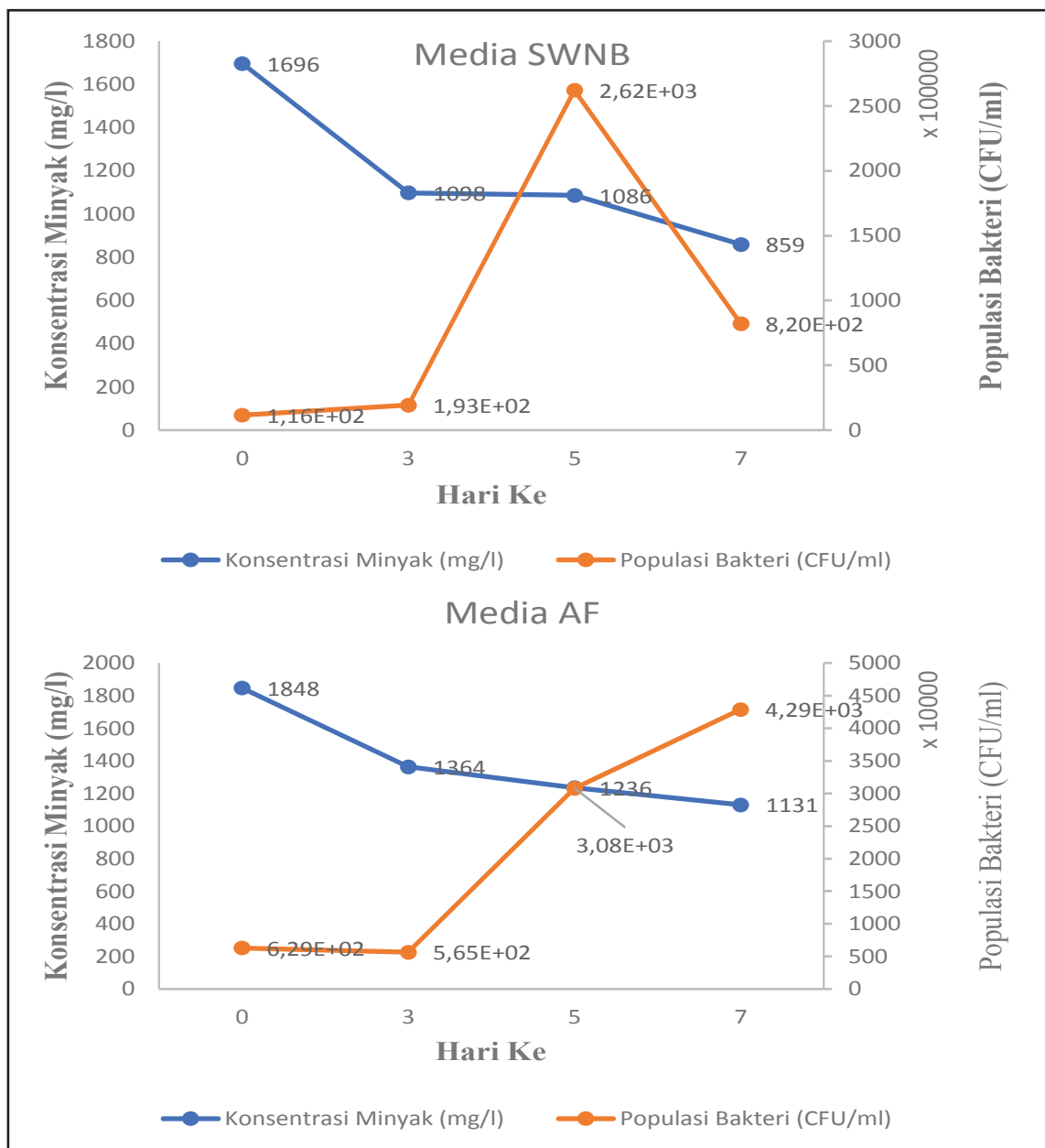
Weathering merupakan proses minyak menyebar dan bergerak di permukaan akibat angin dan arus secara bersamaan terjadi perubahan kimia dan fisika. Proses *weathering* yaitu menyebar, evaporasi, *disperse*, emulsifikasi, *dissolution*, oksidasi, sedimentasi dan *sinking*, dan biodegradasi (ITOPF). Proses ini diduga terjadi pada media dengan bakteri. Pertumbuhan populasi bakteri merupakan salah satu indikator terjadinya proses biodegradasi. Gambar 4 memperlihatkan hubungan

Tabel 2
Persentase biodegradasi dan laju degradasi pada media penelitian

Perlakuan	Presentase degradasi minyak (%)
Media SWNB	49,35
Kontrol SWNB	6,20
Media AF	38,80
Kontrol AF	9,13



Gambar 3
Grafik penurunan konsentrasi minyak (mg/l) pada media SWNB, AF dan kontrolnya dengan bakteri.



Gambar 4 Pengaruh penurunan konsentrasi minyak dengan populasi bakteri.

antara konsentrasi minyak dengan populasi bakteri. Terlihat pada gambar, penurunan konsentrasi minyak menyebabkan populasi bakteri pada media *SWNB* terus meningkat dari hari ke-0 hingga mencapai populasi tertinggi di hari ke-5 dengan jumlah $2,62 \times 10^8$ CFU/ml dan mengalami penurunan di hari ke-7. Hal yang sama terjadi pada media *AF*, populasi mencapai populasi tertinggi pada hari ke 7 sebesar $4,29 \times 10^7$ CFU/ml. Pada media ini sempat mengalami penurunan pada hari ke 3, namun jumlah populasi bakteri tetap memenuhi jumlah yang dibutuhkan untuk melakukan degradasi lebih besar dari dari 10^6 CFU/ml (Nugroho, 2006).

Pengaruh pH media

Nilai pH pada media dengan bakteri menunjukkan nilai yang semakin menurun. Namun nilai pH pada media kontrol mengalami fluktuasi dan cenderung meningkat (Gambar 5) Penurunan nilai pH disebabkan oleh aktivitas bakteri yang membentuk metabolit asam, serta hasil degradasi alkana berupa asam asetat dan asam propionat yang dapat menurunkan nilai pH.

Pengaruh Nutrien

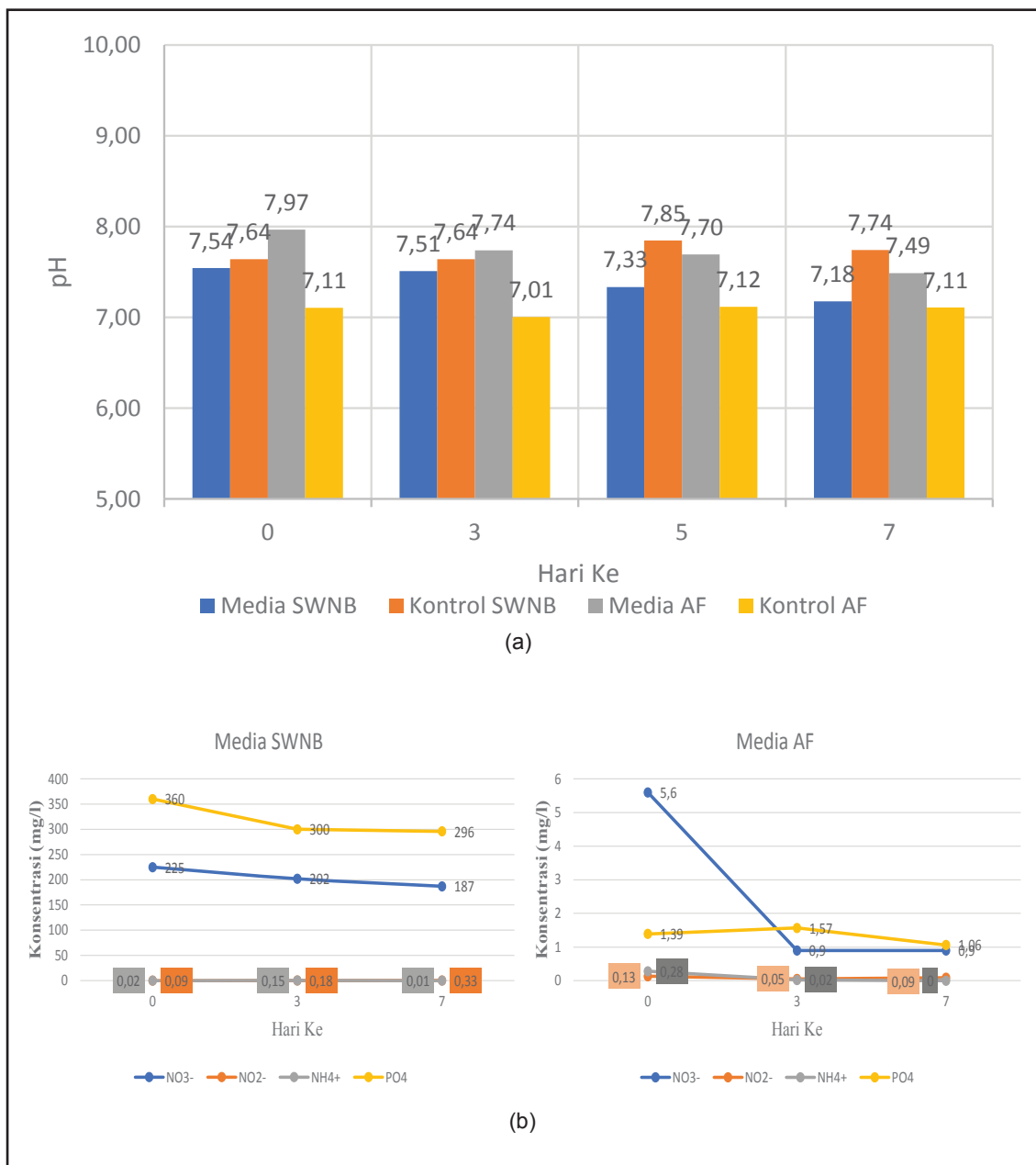
Kadar *nutrient* mempengaruhi pertumbuhan bakteri untuk proses biodegradasi. Nutrien yang

penting adalah nitrogen dan fosfor. Pada proses biodegradasi tumpahan minyak, nutrient menjadi faktor pembatas disaat terjadi peningkatan kadar karbon secara signifikan. Sehingga penelitian ini menggunakan media air laut yang diperkaya dengan *nutrient*.

Kandungan nutrient antara media SWNB dan AF memiliki kadar yang berbeda secara signifikan. Pada media SWNB, kadar nitrat dan fosfat berturut turut 225 - 187 mg/l dan 360-296 mg/l. Sedangkan pada media AF , kadar nitrat dan fosfat berturut turut 5,6 - 0,9 mg/l dan 1,39-1,06 mg/l. Kadar nya ini tinggi

karena perlakuan aerasi untuk nitrat dan penambahan senyawa yang mengandung fosfat. Kadar nitrat tinggi karena ada perlakuan aerasi sehingga kandungan oksigen terlarut meningkat (Komarawidjaja, 2006). Proses ini menyebabkan nitrogen dari urea teroksidasi pada media AF sedangkan pada media SWNB ada NaNO_3 pada saat pembuatan.

Kadar fosfat tinggi karena dalam pembuatan media SWNB mengandung Na_2HPO_4 dan KH_2PO_4 sedangkan pada AF dari NPK. Fosfor dapat larut dalam air dan membentuk ion fosfat (Santoso, 2007). Kadar nitrit dan ammonium relative rendah



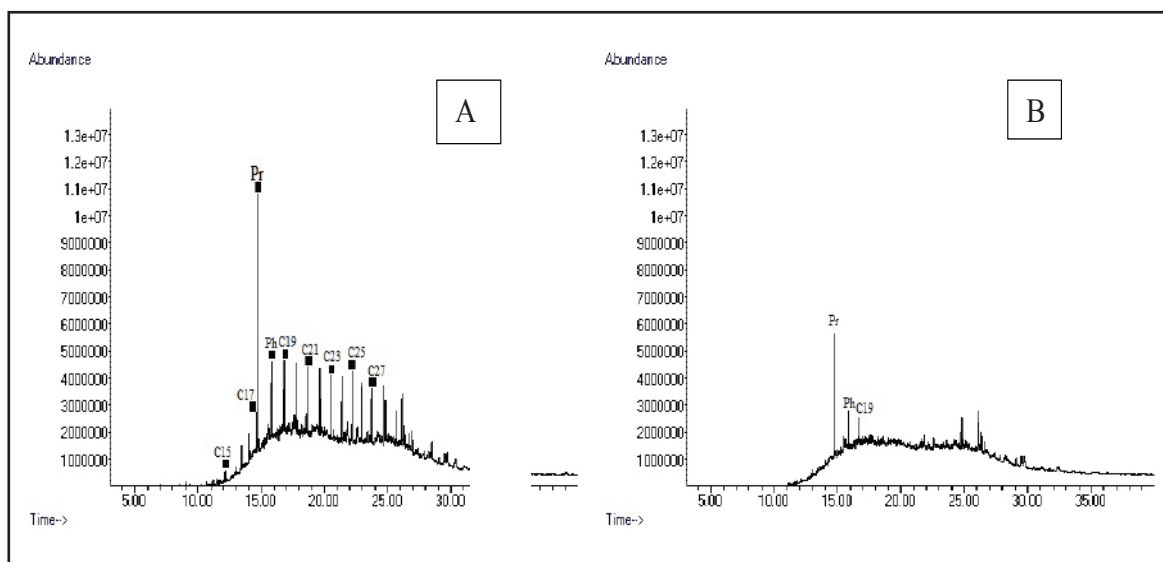
Gambar 5
 (a) Nilai pH pada media SWNB, AF dan kontrolnya selama tujuh hari pengamatan,
 (b) Kadar Nutrien pada media SWNB, AF dan kontrolnya selama tujuh hari pengamatan.

dibandingkan nitrat dan fosfat. Nitrit tidak dapat bertahan lama karena posisinya diantara ammonia dan nitrat serta mudah teroksidasi menjadi nitrat. Proses ini disebut nitrifikasi yang merupakan proses microbial dengan menurunkan senyawa nitrogen (terutama ammonia) teroksidasi berurutan menjadi nitrit dan nitrat. Hal yang sama dengan Ammonium yang merupakan senyawa nitrogen, dia akan mudah teroksidasi menjadi nitrit kemudian nitrat. Ammonium dan Ammonia sulit dipisahkan dan dalam kesetimbangannya bergantung pada pH dan suhu. Pada pH tinggi dan suhu tinggi akan lebih banyak dalam bentuk ammonia dan dengan kondisi sebaliknya lebih banyak dalam bentuk ammonium (Purwono, dkk., 2017).

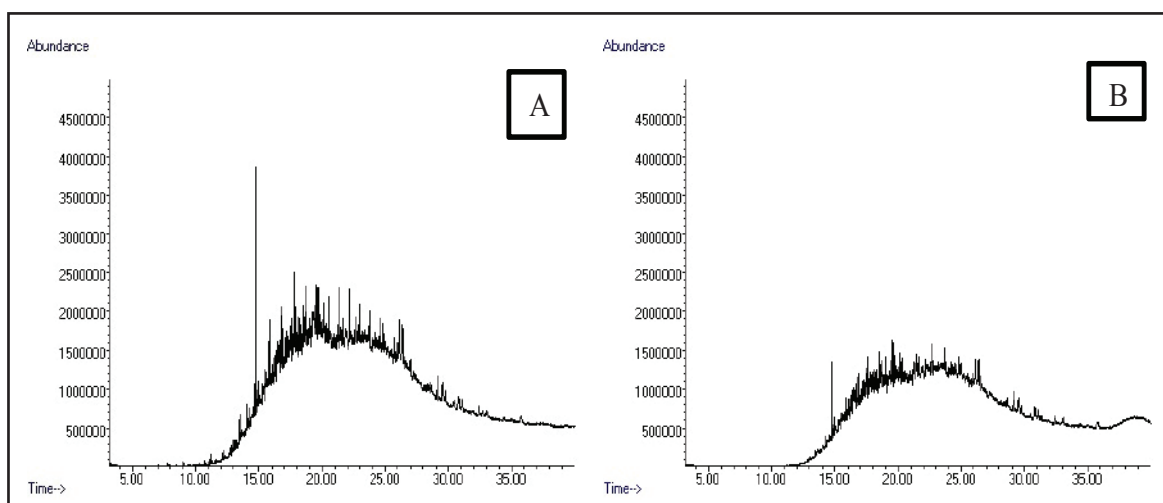
Selama pengamatan, kadar *nutrient* cenderung menurun diperlihatkan Gambar 5. Hal ini disebabkan populasi bakteri meningkat maka mereka memanfaatkan *nutrient* untuk proses degradasi. Kadar *nutrient* yang tinggi pada media SWNB yang menyebabkan populasi bakteri lebih tinggi dibandingkan pada media AF.

Analisis Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Sampel minyak bumi sebelum dan sesudah biodegradasi dianalisis menggunakan GC-MS untuk melihat perubahan komposisi hidrokarbonnya. Sampel dipreparasi dengan metode kromatografi kolom untuk memisahkan fraksi-fraksinya yaitu



Gambar 6 Fraksi *saturated* sebelum (a) dan sesudah (b) biodegradasi.



Gambar 7 Fraksi aromatik sebelum dan sesudah biodegradasi.

Saturated, Aromatik, Resin dan Asphaltene Fraksi *saturated* dan *aromatic* yang diuji dengan GC-MS karena dalam proses biodegradasi akan mudah didegradasi. Fraksi resin dan asphaltene resisten terhadap biodegradasi (Ogbo & Okhuoya, 2008).

Gambar 6 (A-B) memperlihatkan kromatogram komposisi hidrokarbon dari fraksi *saturated* sebelum dan sesudah biodegradasi. Pada Gambar 6A, sampel minyak sebelum biodegradasi terlihat distribusi hidrokarbon nC_{15} - nC_{27} , Pristane (Pr) dan Phytane (Ph). Karbon sebelum nC_{15} tidak terlihat karena merupakan senyawa dengan berat molekul rendah yang mudah menguap karena *weathering* dan preparasi sampel. Gambar 6B, sampel minyak setelah biodegradasi hanya terlihat Pristane dan Phytane dengan persentase yang menurun sebesar 24,33% dan 21,14% dibandingkan sebelum biodegradasi. Pristane dan Phytane merupakan senyawa isoprenoid yang lebih tahan terhadap efek biodegradasi dibandingkan *n* paraffin. Sehingga rasio antara nC_{17} /Pristane, nC_{18} /Phytane dan Pristane/Phytane dapat digunakan sebagai indikasi biodegradasi. tumpahan minyak akibat pengaruh degradasi microbial di lokasi tumpahan minyak. (Hansen, dkk., 2007).

Gambar 7 (A-B) memperlihatkan kromatogram komposisi hidrokarbon dari fraksi aromatik sebelum dan sesudah biodegradasi. Pada gambar terlihat sebelum dan sesudah masih memiliki puncak-puncak senyawa hidrokarbon yang masih banyak karena senyawa *aromatic relative* lebih tahan degradasi bila dibandingkan dengan senyawa *saturated*. Namun persentase sesudah biodegradasi lebih rendah dibandingkan sebelum biodegradasi. Senyawa-senyawa aromatik yang ada di sampel seperti benzene, naphthalene, anthrasena, phenathrene beserta turunannya. Proses biodegradasi PAH dimulai dengan pemecahan cincin benzene oleh bakteri dan katalis enzim dioksigenase. Benzene yang terlepas dioksidasi menjadi senyawa-senyawa lain dan digunakan sel mikroba untuk sumber energi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian penggunaan media SWNB dan AF dengan bakteri konsorsium *Raoultella* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Enterobacter* sp. dapat mendegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi. Persentase penurunan kadar minyak untuk media SWNB dan AF berturut-turut sebesar 49,35% dan 38,80% pada pengamatan hari ke 7. Populasi

bakteri meningkat dengan menurunnya konsentrasi minyak. Kadar *nutrient* di media mempengaruhi pertumbuhan bakteri yang berhubungan dengan proses biodegradasi. Fraksi *saturated* lebih mudah terdegradasi dibandingkan fraksi *aromatic* berdasarkan analisa GCMS.

DAFTAR ISTILAH / SINGKATAN

Simbol	Definisi	Satuan
APHA	American Public Health Association	
API	American Petroleum Institute	
ASTM	American Society and Testing Materials	
CFU	Colony-Forming Unit	
CH ₂ Cl ₂	Dichloromethane	
KCl	Pottasium Chloride	
KH ₂ PO ₄	Pottasium dihydrogen phosphate	
MgSO ₄ .7H ₂ O	Magnesium sulfate heptahydrate	
Na ₂ HPO ₄	Disodium phosphate	
Na ₂ SO ₄	Sodium sulfate	
NaCl	Sodium chloride	
NaNO ₃	Sodium nitrate	
n-C ₆ H ₁₄	Normal-Hexane	
NH ₄ ⁺	Ammonium	
NO ₂ ⁻	Nitrite	
NO ₃ ⁻	Nitrate	
NPK	Nitrogen, Phosporus dan Kalium	
PO ₄ ³⁻	Phospate	
PSU	Practical Salinity Units	
Pupuk Urea	Pupuk kimia dengan rumus kimia CO(NH ₂) ₂ yang mengandung Nitrogen (N) berkadar tinggi	
Saturated	Senyawa hidrokarbon jenuh bersifat non polar terdiri dari rantai lurus (parafin), bercabang (isoparafin) dan siklik (naphthene)	
Aromatik	Senyawa hidrokarbon sedikit polar yang memiliki satu atau lebih cincin aromatik	

Simbol	Definisi	Satuan
Resin	Senyawa hidrokarbon bersifat polar dan larut dalam heptane (atau pentane)	
Asphaltene	Senyawa hidrokarbon bersifat polar dan tidak laruh dalam heptane (atau pentane) berlebih	

KEPUSTAKAAN

- Aditiawati, P., Pikoli, M. R. & Indriani A, D.**, 2001. *Isolasi Bertahap Bakteri Pendegradasi Minyak Bumi dari Sumur Bangko*. Yogyakarta, IATMI.
- Adzini, I. N., Dermawan, D. & Apriani, M.**, 2019. *Pengaruh Penambahan Bakteri Pseudomonas aeruginosa pada Bioremediasi Total Petroleum Hydrocarbon Penambangan Minyak Bumi Tradisional di Jawa Timur*. Surabaya, Indonesia, Conference Proceeding on Waste Treatment Technology.
- Ahmed, A. W., Alzubaidi, F. S. & Hamza, S. J.**, 2014. Biodegradation of crude oil in contaminated water by local isolates of Enterobacter cloacae. *Iraqi Journal of Science*, 55(3A), pp. 1025-1033.
- Badan Standardisasi Nasional**, 2011. *Air dan air limbah - Bagian 10 : Cara uji minyak dan lemak secara gravimetri*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Cappello, S, Caruso, G., Zampino, D., Monticelli, L.S., Maimone, G., Denaro, R., Tripodo, B., Troussellier, M., Yakimov, M., & Giuliano, L.**, 2006. Microbial community dynamics during assays of harbour oil spill bioremediation: a microscale simulation study. *Journal of Applied Microbiology*, 102(1), pp. 184-194.
- Darmayati, Y. & Afianti, N. F.**, 2017. Penerapan dan Tingkat Efektivitas Teknik Bioremediasi untuk Perairan Pantai Tercemar Minyak. *OSEANA*, 42(4).
- Darmayati, Y., Sanusi, H.S., Partono, T., Santosa, D.A., & Nuchsin, R.**, 2015. The effect of biostimulation and biostimulation-bioaugmentation on biodegradation of oil-pollution on sandy beaches using mesocosms. *International Journal of Marine Science*, 5(27), pp. 1-11.
- Dawson, T. D. & Chang, F. H.**, 1992. Screening test of the biodegradative capability of a new strain of Pseudomonas gladioli (BSU 45124) on some xenobiotic organics. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 49(1), pp. 10-17.
- Dwinovantyo, A., Prartono, T. & Syafrizal**, 2015. *Potensi pemanfaatan bakteri sedimen laut dalam untuk biodegradasi tumpahan minyak bumi skala laboratorium*. Bogor: IPB.
- Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM)**, 2019. *Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*. Jakarta: ESDM.
- French-McCay, D. P.**, 2004. Oil spill impact modeling: development and validation. 23(10), pp. 2441-2456.
- Guo-liang, Z., Yue-ting, W., Xin-ping, Q. & Qin, M.**, 2005. Biodegradation of crude oil by Pseudomonas aeruginosa in the presence of rhamnolipids. *Journal of Zhejiang University Science*, Volume 6, p. 725-730.
- Hansen, A. B., Daling, P. S., Faksness, L.-G. & Sørheim, K. R.**, 2007. *merging CEN Methodology for Oil Spill Identification*. In book: *Oil spill environmental forensics: Fingerprinting and source identification*. : Elsevier/Academic Press.
- Kementerian Lingkungan Hidup**, 2006. *Pedoman Penanggulangan Dampak Lingkungan Akibat Tumpahan Minyak di Laut*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- Kementrian Kelautan dan Perikanan**, 2021. <https://kkp.go.id/djprl/p4k>. [Online] Available at: <https://kkp.go.id/djprl/p4k/page/2626-tumpahan-minyak-oil-spill> [Accessed 2021].
- Komarawidjaja, W.**, 2006. Pengaruh perbedaan dosis oksigen terlarut (DO) pada degradasi amonium kolam kajian budidaya udang. *Jurnal Hidrosfir Indonesia*, 1(1), pp. 32-37.
- Kuncowati**, 2010. Pengaruh pencemaran minyak di laut terhadap ekosistem laut. *Jurnal Aplikasi Pelayaran dan Kepelabuhan*, 1(1), pp. 18-22.
- Kurniawan, A. & Effendi, A. J.**, 2014. Biodegradasi residu total petroleum hidrokarbon di bawah konsentrasi 1% (w/w) hasil proses bioremediasi. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 21(3).
- Lasari, D. P.**, 2021. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita>. [Online] Available at: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/bakteri-pengolah-limbah-minyak-bumi-yang-ramah-lingkungan>
- Nugroho, A.**, 2010. Biodegradasi sludge minyak bumi dalam skala mikrokosmos: simulasi sederhana sebagai kajian awal bioremediasi land treatment. *Makara Journal of Technology*, 10(2).
- Ogbo, E. M. & Okhuoya, J. A.**, 2008. Biodegradation of aliphatic, aromatic, resinic, and asphaltic fractions of crude oil contaminated soils by Plero.

- African Journal of Biotechnology*, 7(23), pp. 4291-4297.
- Okoro, C. C.**, 2010. Application of seawater microbial inocula for the remediation of hydrocarbon polluted mangrove swamp in the Nigerian oil rich Niger Delta. *Journal Nature and Science*, pp. 152-162.
- Parshetti, G., Kalme, S., Saratale, G. D. & Govindwar, S. P.**, 2006. Biodegradation of malachite green by *Kocuria rosea* MTCC 1532. *Acta Chimica Slovenica*, 53(4), pp. 492-498.
- 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), pp. 80-86.
- Purwono, Rezagama, A., Hibbaan, M. & Budihardjo, M. A.**, 2017. Ammonia-Nitrogen (NH₃-N) and Ammonium-Nitrogen (NH₄⁺-N) Equilibrium on The Process of Removing Nitrogen By Using Tubular Plastic Media. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(S), pp. 4915-4922.
- Rodrigues, D. F, Sakata, S.K., Comasseto, J.V., Bicego, M.C., & Pellizari, V.H.**, 2009. Diversity of hydrocarbon-degrading *Raoultella* isolated from hydrocarbon-contaminated estuaries. *Journal Applied Microbiology*, 106(4), pp. 1304-14.
- Sabhan , Mudin, Y. & Babanggai, . M.**, 2014. emodelan tumpahan minyak di Teluk Lalong Kabupaten Banggai. *Natural Science*, 3(2).
- Santoso, A. D.**, 2007. Kandungan zat hara fosfat pada musim barat dan musim timur di Teluk Hurun Lampung. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 8(3), pp. 207-210.
- Sulistiyono, S.**, 2013. *Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut pada Kegiatan Industri Migas dan Metode Penanggulangan*. [Online] Available at: <http://ejurnal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/55>
- Susanthi, D., Sudiana, I. M. & Sembiring, L.**, 2009. *Bakteri laut isolat Pulau Pari pendegradasi komponen crude oil*. Yogyakarta, Universitas Negeri Yogyakarta.
- Tyagi, M., da Fonseca, M. & de Carvalho, C.**, 2011. Bioaugmentation and biostimulation strategies to improve the effectiveness of bioremediation processes. *Biodegradation*, Volume 22, p. 231–241.
- Vidali, M.**, 2001. Bioremediation. An Overview. *Pure Appl. Chem*, 73(7), p. 1163–1172.