



Kemampuan *Bacillus sp.* Sebagai Bioremediasi Bahan Pencemar

Rizka Oktavia¹, Endang Nurcahyani², Sri Wahyuningsih², Sumardi^{2*}

¹Program Studi Magister Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Lampung Jl. Prof. Dr.Ir. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Bandar Lampung, Indonesia

²Jurusan Biologi, Fakultas MIPA, Universitas Lampung Jl. Prof. Dr.Ir. Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedong Meneng, Bandar Lampung, Indonesia

*email: sumardi_bio@yahoo.co.id

Abstract: The ability of *Bacillus Sp.* as a Pollutant Bioremediation. The presence of heavy metal sources in inappropriate places can contaminate the surrounding soil, so that it will interfere with human and animal health if they enter the food chain. The purpose of writing this review is to determine the ability of *Bacillus* in bioremediation of pollutants and to determine the enzymes in *Bacillus* that are able to remediate pollutants. Monooxygenase enzymes and dioxygenase enzymes produced by bacteria can open carbon bonds in aromatic rings and produce primary alcohols. Dioxygenase enzymes produced by bacteria reduce PAHs and form cis-dihydrodiol. This compound is then dehydrogenated to form dihydroxy-PAH which is a substrate for the ring-opening enzyme. Through the addition of one oxygen molecule, the monooxygenase enzyme can also reduce PAH and form arene oxide, then these molecules will be used by bacteria as a source of nutrition. *Bacillus* bacteria are able to remediate various kinds of pollutants. These bacteria are able to reduce these pollutants because they have hydrocarbon enzymes that will break down harmful chemical compounds in pollutants into simpler compounds that can be used as energy sources.

Keywords: bacillus, bioremediation, enzymes, pollutants

Abstrak: Kemampuan *Bacillus Sp.* Sebagai Bioremediasi Bahan Pencemar. Keberadaan sumber logam berat pada tempat yang tidak sesuai dapat mencemari tanah sekitarnya, sehingga akan mengganggu kesehatan manusia dan hewan apabila masuk kedalam rantai makanan. Adapun tujuan dari penulisan review ini adalah untuk mengetahui kemampuan *Bacillus* dalam bioremediasi bahan pencemar dan untuk mengetahui enzim pada *Bacillus* yang mampu meremediasi bahan pencemar. Enzim monooksigenase dan enzim dioksigenase yang diproduksi oleh bakteri dapat membuka ikatan karbon pada cincin aromatik dan menghasilkan alkohol primer. Bakteri *Bacillus* mampu memproduksi enzim dioksigenasi yang dimanfaatkan untuk mereduksi PAH dan membentuk cis-dihidrodiol. Senyawa ini kemudian didehidrogenasi untuk membentuk dihidroksi-PAH yang merupakan substrat untuk enzim membuka cincin. Melalui penambahan satu molekul oksigen maka enzim monooksigenase juga dapat mereduksi PAH dan membentuk arene oksida, selanjutnya molekul-molekul ini akan digunakan oleh bakteri sebagai sumber nutrisi. Bakteri *Bacillus* mampu meremediasi berbagai macam bahan pencemar. Bakteri ini mampu mereduksi bahan pencemar tersebut karena memiliki enzim hidrokarbon yang akan memecah senyawa kimia berbahaya pada bahan pencemar menjadi senyawa yang lebih sederhana yang dapat dipakai sebagai sumber energi.

Kata kunci: bacillus, bahan pencemar, bioremediasi, enzim

PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan merupakan perubahan kondisi lingkungan yang diakibatkan oleh kegiatan manusia atau proses alam dan adanya makhluk hidup, substansi, energi dan atau komponen lain didalam lingkungan sehingga mengakibatkan menurunnya kualitas lingkungan sampai ketinggian tertentu sehingga lingkungan tidak dapat lagi dimanfaatkan sebagaimana fungsinya.

Aktivitas eksplorasi dan eksploitasi pengelolaan minyak bumi dapat menjadi penyebab terjadinya pencemaran minyak mentah. Aktivitas eksplorasi dan eksploitasi minyak bumi dapat dilaksanakan di daerah daratan dan di daerah yang terletak di wilayah pesisir ataupun laut lepas. Aktivitas industri perminyakan juga dapat memicu masalah pencemaran minyak mentah karena dapat menghasilkan limbah yang mencemari lingkungan. Limbah minyak terdiri atas berbagai senyawa, diantaranya yaitu hidrokarbon ringan, hidrokarbon berat, pelumas, dan bahan lain dalam hidrokarbon. Selain itu proses pengeboran dan pengilangan minyak bumi juga menghasilkan lumpur minyak dalam jumlah besar. Menurut UU No.23 tahun 1997 dan PP No.18 tahun 1999 lumpur minyak dikategorikan kedalam limbah B3 dan termasuk bahan pencemar yang sangat berbahaya.

Pencemaran minyak memiliki akibat jangka panjang bagi makhluk hidup terutama pada biota laut yang masih muda karena senyawa tersebut dapat termakan oleh biota-biota laut. Sebagian senyawa yang termakan dapat dikeluarkan bersama sama makanan, sedang sebagian lagi dapat tertimbun dalam senyawa lemak dan protein. Sifat penimbunan ini dapat berpindah dari organisme satu ke organisme lain melalui rantai makanan. Jadi, timbunan minyak di dalam zooplankton dapat berpindah ke ikan pemangsanya. Demikian selanjutnya apabila ikan tersebut termakan oleh ikan yang lebih besar, hewan-hewan laut lainnya, dan bahkan manusia.

Pencemaran lingkungan terjadi karena ketersediaan sumber logam berat yang salah tempat dan mencemari tanah sehingga akan mengganggu kesehatan manusia dan hewan bila masuk ke dalam rantai makanan. Pencemaran logam berat pada masa kini perlu mendapat perhatian khusus. sumber pencemaran logam berat di suatu tempat secara umum berasal dari proses alam (misalnya aktivitas gunung berapi) atau akibat kegiatan manusia, seperti pertambangan (minyak, emas dan batubara), pembangkit listrik, peleburan logam, pabrik pupuk dan penggunaan bahan sintetik. Cemar akan terus bertambah sejalan dengan meningkatnya kegiatan eksplotasi berbagai sumber alam dengan kandungan logam berat di dalamnya. Proses industri dan urbanisasi berperan penting terhadap peningkatan pencemaran tersebut. Beberapa logam polutan yang sangat perlu diketahui yaitu arsenik(As), boron (B), kadmium (Cd), tembaga (Cu), merkuri(Hg), molybdenum (Mo), nikel (Ni), timbal (Pb), selenium (Se) dan seng (Zn). Logam berat dan cemarannya berbahaya untuk lingkungan.

Teknik bioremediasi dapat menjadi salah satu alternatif usaha untuk mengurangi pencemaran minyak bumi dan kerusakan tatanan lingkungan. Teknik ini telah dilakukan untuk menguraikan bahan pencemar minyak dengan menggunakan bakteri pendegradasi hidrokarbon yang ditemukan di situs tercemar ataupun bakteri yang diintroduksi ke wilayah tercemar. Bioremediasi adalah proses untuk mengurangi efek negatif dari industri yang menghasilkan limbah/polusi logam berat. Istilah miko-bioremediasi (mikoremediasi) berasal dari miko (cendawan) bio (hidup) dan remediasi (pemulihan kembali) yang berarti menggunakan cendawan untuk menghilangkan senyawa yang mencemari air, lumpur dan tanah sehingga lingkungan kembali menjadi bersih dan alamiah. Bioremediasi pada lahan tercemar logam berat didefinisikan sebagai proses

pemulihan lahan dari bahan-bahan pencemar/polutan secara biologis atau dengan menggunakan organisme hidup.

Bakteri yang mampu mendegradasi senyawa yang terdapat di dalam hidrokarbon minyak bumi disebut bakteri hidrokarbonoklastik. Bakteri ini mampu mendegradasi zat hidrokarbon dengan menggunakan zat tersebut sebagai sumber karbon dan energi yang diperlukan bagi pertumbuhannya. Salah satu sumber bakteri pendegradasi minyak bumi yang telah banyak diteliti adalah lingkungan tercemar limbah minyak bumi. Isolat yang paling banyak ditemukan pada lingkungan tersebut terdiri atas beberapa genus, yaitu *Alcaligenes*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Nocardia*, *Achromobacter*, *Bacillus*, *Flavobacterium*, dan *Pseudomonas*. Selain itu juga ditemukan bebra[a jamur pendegradasi minyak bumi, yaitu dari genus *Aureobacterium*, *Candida*, *Rhodotorula*, *Sporobolomyces* yang diisolasi dari laut serta *Trichoderma* dan *Mortierella* yang diisolasi dari tanah. Adapun tujuan dari penulisan review ini adalah untuk mengetahui kemampuan *Bacillus* dalam bioremediasi bahan pencemar dan untuk mengetahui enzim pada *Bacillus* yang mampu meremediasi polutan

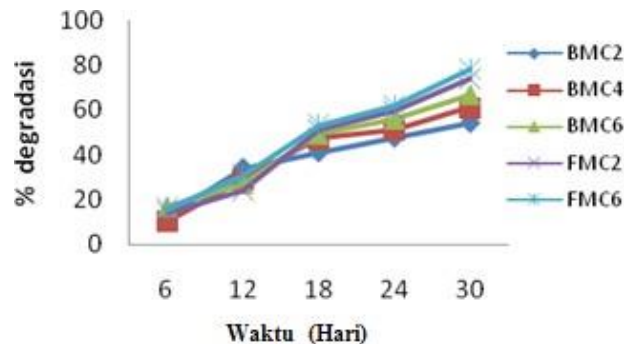
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bahan Pencemar. Bahan pencemar (polutan) merupakan bahan-bahan yang bersifat asing bagi alam atau bahan yang berasal dari alam itu sendiri yang memasuki suatu tatanan ekosistem sehingga mengganggu peruntukan ekosistem tersebut. Sumber pencemaran yang masuk ke badan perairan dibedakan atas pencemaran yang disebabkan oleh alam (polutan alamiah) dan pencemaran karena kegiatan manusia (polutan antropogenik). Air buangan industri adalah air buangan dari kegiatan industri yang dapat diolah dan digunakan kembali dalam proses atau dibuang ke badan air setelah diolah terlebih dahulu sehingga polutan tidak melebihi ambang batas yang diijinkan (Effendi, 2003).

Berdasarkan sifat toksiknya, polutan/pencemar dibedakan menjadi dua, yaitu polutan non toksik (non-toxic pollutants) dan polutan toksik (toxic pollutants) (Effendi, 2003). Polutan/pencemar non toksik biasanya telah berada pada ekosistem secara alami. Sifat destruktif pencemaran ini muncul apabila berada dalam jumlah yang berlebihan sehingga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem melalui perubahan proses fisika-kimia perairan. Polutan non toksik terdiri atas bahan-bahan tersuspensi dan nutrisi. Bahan tersuspensi dapat mempengaruhi sifat fisika perairan, antara lain meningkatkan kekeruhan sehingga menghambat penetrasi cahaya matahari. Dengan demikian, intensitas cahaya matahari pada kolom air menjadi lebih kecil dan intensitas yang dibutuhkan untuk melangsungkan proses fotosintesis. Keberadaan nutrisi/unsur hara yang berlebihan dapat memacu terjadinya pengayaan (eutrofikasi) perairan dan dapat memicu pertumbuhan mikroalga dan tumbuhan air secara pesat (blooming), yang selanjutnya dapat mengganggu keseimbangan ekosistem akuatik secara keseluruhan.

Polutan toksik dapat mengakibatkan kematian (lethal) maupun bukan kematian (sub-lethal), misalnya terganggunya pertumbuhan, tingkah laku, dan karakteristik morfologi berbagai organisme akuatik. Polutan toksik ini biasanya berupa bahan-bahan yang bukan bahan alami, misalnya pestisida, detergen, dan bahan artificial lainnya. Polutan berupa bahan yang bukan alami dikenal dengan istilah xenobiotik (polutan artificial), yaitu polutan yang diproduksi oleh manusia (man-made substances). Polutan yang berupa bahan-bahan kimia bersifat stabil dan tidak mudah mengalami degradasi sehingga bersifat persisten di alam dalam kurun waktu yang lama. Polutan ini disebut rekalsitran.

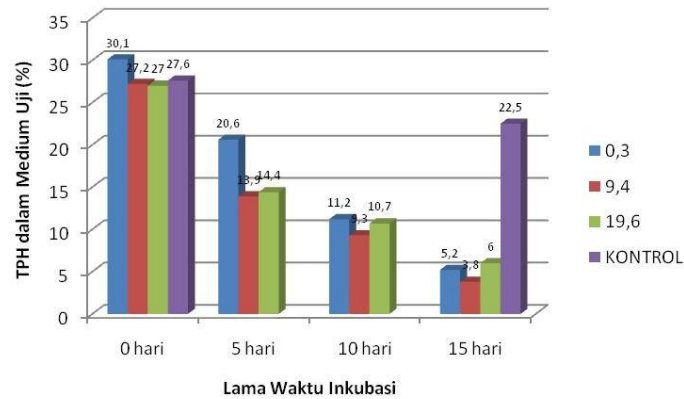
Kemampuan Isolat *Bacillus* dalam mendegradasi minyak bumi dari tanah tercemar. Parameter yang diukur yaitu *Petroleum Hidrokarbon* (TPH), TPH merupakan total minyak bumi yang terdegradasi (% TPH), kadar minyak terdegradasi (% TPH) dianalisis secara Gravimetri dan dilaporkan dalam bentuk persentase (%). Hasil pengujian kemampuan masing-masing isolat terpilih dalam mendegradasi hidrokarbon selama 30 hari inkubasi diperlihatkan pada Gambar 1. yaitu adanya penurunan TPH. Berdasarkan gambar tersebut penurunan TPH terbesar dicapai oleh isolat kapang *Aspergillus niger* (FMC6), yaitu 78%.



Gambar 1. Kemampuan isolat terpilih dalam mendegradasi minyak bumi (TPH) dari isolat *Bacillus cereus* (BMC2), *Bacillus* sp. (BMC4), *Pseudomonas* sp. (BMC6), *Aspergillus fumigatus* (FMC2), dan *Aspergillus Niger* (FMC6) (Sudrajad dkk, 2015).

Isolat-isolat yang berpotensi untuk mendegradasi hidrokarbon selama 30 hari masa inkubasi dapat dilihat pada Gambar 1. yaitu terjadi penurunan TPH. Pada Gambar 1. Dapat dilihat bahwa penurunan TPH terbesar dicapai oleh isolat kapang *Aspergillus niger* (FMC6), yaitu 78%. Hal ini kemungkinan disebabkan *Aspergillus niger* merupakan bakteri yang berkemampuan enzimatik lebih lengkap untuk menguraikan hidrokarbon, sehingga mampu menguraikan komponen minyak karena dapat mengoksidasi hidrokarbon yang dimanfaatkan sebagai donor elektronnya. Sementara urutan besarnya presentasi penurunan TPH isolat lainnya adalah isolat *Aspergillus fumigatus* (FMC2), *Pseudomonas* sp (BMC6), *Bacillus* sp (BMC4), dan *Bacillus cereus* (BMC2) masing-masing sebesar 74, 67, 61, dan 54%. penguraian serta jumlah yang lebih banyak dibanding dengan isolat tunggal. Adanya variasi tingkat penguraian (daya katalis) dan jumlah enzim yang lebih banyak akan menyebabkan penguraian minyak lebih cepat.

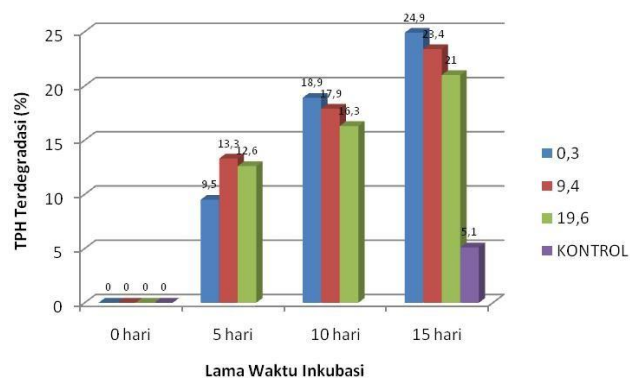
Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Oleh *Bacillus* dengan Salinitas yang Berbeda. Pengujian nilai persentase TH pada medium uji selama 15 hari masa menunjukkan hasil yaitu terjadi penurunan kadar TPH pada setiap sampel medium uji yang diinokulasikan *Bacillus cereus* (VIC) maupun pada kontrol (Gambar 2)



Gambar 2. Diagram batang persentase TPH dalam medium uji selama masa inkubasi 15 hari (Baktinegara dkk,2015).

Mikroba hidrokarbon oklastik memanfaatkan hidrokarbon pada minyak mentah sebagai sumber energi dan karbon yang diperlukan untuk pertumbuhannya. Seiring dengan masa adaptasinya di medium yang baru, *Bacillus cereus* (VIC) akan mensintesis enzim monooksigenase untuk mendegradasi hidrokarbon dalam minyak mentah menjadi alkohol yang akan diubah kembali menjadi asam asetat dan asam karboksilat (Kim dan Gadd, 2008). Asam asetat dan asam karboksilat yang dihasilkan akan digunakan pada aktivitas metabolik bakteri sehingga persentase TPH dalam medium uji terus menurun hingga hari ke- 15 masa inkubasi.

Biodegradasi hidrokarbon oleh *Bacillus cereus* (VIC) tetap berlangsung selama masa adaptasi mikroba dalam kondisi medium yang baru. Meskipun keadaan medium tidak dapat mendukung pertumbuhan yang optimal pada *Bacillus cereus* (VIC) tetapi bakteri tersebut memiliki rentang toleransi yang cukup tinggi terhadap peningkatan kadar salinitas hingga 19,6 sehingga hidrokarbon dalam minyak mentah tetap terbiodegradasi karena dimanfaatkan sebagai sumber karbon oleh *Bacillus cereus* (VIC) agar dapat bertahan hidup selama fase lag bersamaan dengan pemanfaatan nutrisi lain yang telah ditambahkan ke dalam medium uji (Gambar 3).

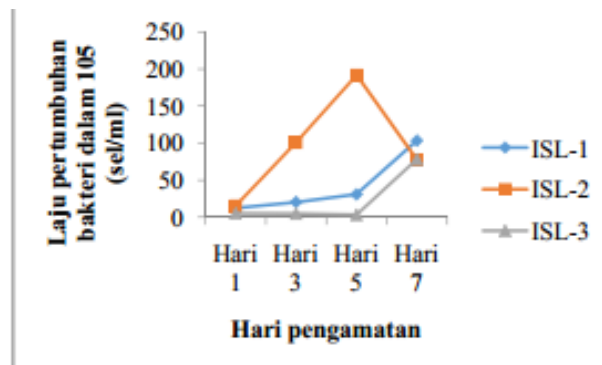


Gambar 3. Diagram batang persentase TPH terdegradasi selama masa inkubasi 15 hari (Baktinegara,2015).

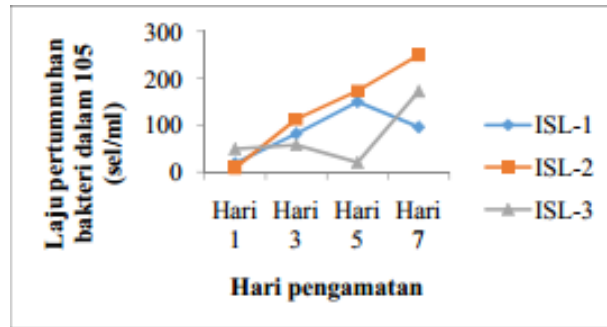
Gambar 3 menunjukkan adanya selisih antara persentase TPH terdegradasi pada awal inokulasi dan pada hari-hari sesudahnya pada setiap medium uji. Terdapat

perbedaan persentase TPH terdegradasi pada hari ke-5 kadar salinitas di ketiga medium menunjukkan hasil yang berbeda, yaitu degradasi TPH dalam medium dengan kadar salinitas 9,4 dan 19,6 lebih tinggi dibanding degradasi TPH dalam medium dengan kadar salinitas 0,3, namun pada hari ke-10 dan ke-15 menunjukkan degradasi TPH dalam medium dengan kadar salinitas 0,3 lebih tinggi dibandingkan dalam medium dengan kadar salinitas 9,4 dan 19,6. Menurut Margesin dan Schinner (2001), biodegradasi hidrokarbon pada lingkungan bersalinitas tinggi sangat dipengaruhi oleh penambahan nutrisi berupa nitrogen dan posfor yang akan digunakan bakteri untuk hidup dan mensintesis enzim pendegradasi hidrokarbon selama fase lag. Nutrisi yang dibutuhkan dan dipakai dalam aktivitas metabolisme selama fase lag menjadi lebih tinggi agar bakteri dapat bertahan hidup dan beradaptasi pada kondisi lingkungan yang ekstrim seperti peningkatan tekanan osmotik akibat penambahan kadar salinitas. Fase lag yang dialami oleh *Bacillus cereus* (VIC).

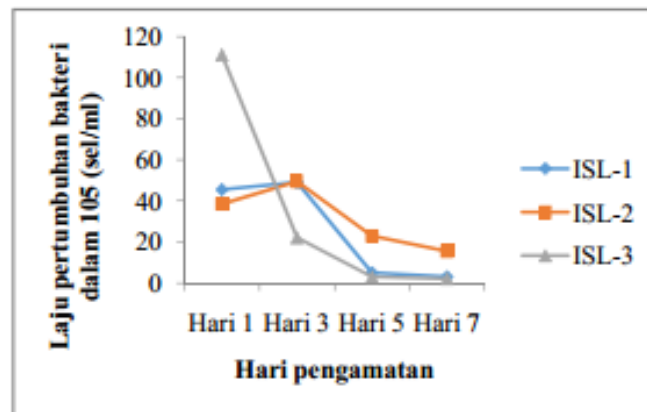
Uji Kemampuan Bakteri dalam Mendegradasi Minyak Solar. Sebanyak 3 isolat bakteri pendegradasi minyak solar yang telah diisolasi dan diseleksi selanjutnya dilakukan pengujian potensi isolat tersebut dalam mendegradasi minyak solar. Pertumbuhan sel isolat bakteri pada setiap perlakuan dihitung secara langsung menggunakan metode *Standart Plate count* (SPC) dengan menggunakan *colony counter* dengan pengenceran 10^{-5} pada hari ke-1, ke-3, ke-5 dan ke-7. Pertumbuhan isolat bakteri pada medium cair mengandung minyak solar 1%, 2% dan 3% bervariasi dari setiap koloni. Pertumbuhan dari setiap isolat pada medium yang mengandung minyak solar selama tujuh hari memperlihatkan adanya keberagaman pertumbuhan. Isolat 2 mengalami pertumbuhan yang tinggi pada setiap konsentrasi minyak yang diujikan, ini menunjukkan bahwa isolat bakteri tersebut mampu tumbuh pada daerah yang mengandung minyak dan menggunakan minyak tersebut sebagai sumber karbon untuk pertumbuhan (Gambar 4,5,dan 6).



Gambar 4. Laju pertumbuhan isolat bakteri pada konsentrasi minyak 1% pada pengenceran 10^{-5} (Hasyimudin, dkk. 2016)



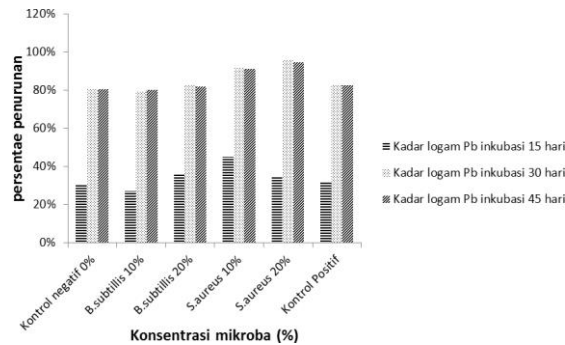
Gambar 5. Laju pertumbuhan bakteri pada konsentrasi minyak 2% pada pengenceran 10^{-5} (Hasyimudin, dkk. 2016)



Gambar 6. Laju pertumbuhan bakteri pada konsentrasi minyak 3% pada pengenceran 10^{-5} (Hasyimudin, dkk. 2016)

Pada Gambar 4, 5 dan 6 diketahui bahwa pertumbuhan bakteri tertinggi terjadi pada Isolat 2. Angka tertinggi terjadi pada konsentrasi minyak 2% pada hari ke-7 yakni sebesar 250×10^5 sel/mL. Hal ini disebabkan konsentrasi yang tinggi mampu mempengaruhi kerja enzim yang dihasilkan oleh bakteri sehingga bakteri tidak dapat berkembang dengan baik (Ali, 2005). Potensi bakteri mendegradasi minyak solar diakibatkan karena bakteri menghasilkan enzim yang mampu memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Enzim monooksigenase dan enzim dioksigenase yang dihasilkan oleh bakteri mampu membuka ikatan karbon pada cincin aromatik dan menghasilkan alkohol primer. Enzim dioksigenase yang dihasilkan oleh bakteri mereduksi PAH dan membentuk cis-dihidrodiol. Senyawa ini kemudian didehidrogenasi untuk membentuk dihidroksi-PAH yang merupakan substrat untuk enzim membuka cincin. Melalui pemberian satu molekul oksigen maka enzim monooksigenase juga dapat mereduksi PAH dan membentuk arene oksida, selanjutnya molekul-molekul ini akan digunakan oleh mikroba sebagai sumber nutrisi untuk pertumbuhan dan energi.

Bioremediasi Logam Pb pada Limbah Tekstil dengan *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis*. Kadar logam masing-masing memiliki konsentrasi yang berbeda-beda pada setiap waktu inkubasi. Hasil penurunan terbaik terjadi pada inkubasi 30 hari dengan penambahan *S.aureus* 20%, Inkubasi 45 hari menunjukkan persentase penurunan logam berat Pb pada sedimen limbah tekstil relatif stabil,



Gambar 7. Persentase (%) penurunan kadar logam Pb pada sedimen limbah tekstildengan mikroba eksogen *S. aureus* dan *B. Subtilis* (Maulana,dkk.2017).

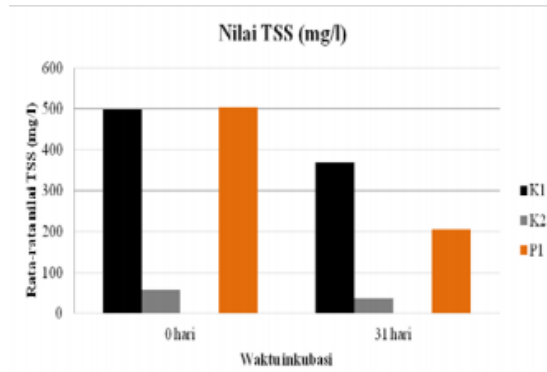
Berdasarkan Gambar 7 dapat kita ketahui bahwa hasil penurunan terbaik terjadi pada inkubasi 30 hari dengan penambahan *S.aureus* 20%, hal ini disebabkan karena bakteri *S.aureus* termasuk kedalam kelompok bakteri gram positif, dimana dinding selnya mengandung peptidoglika yang menjadi tempat pengendapan logam yang efisien. Hasil penurunan kadar logam *S. Aureus* lebih baik dari *B.subtilis*, hal ini diasumsikan karena *S.aureus* berukuran lebih besar dari *B. subtilis* (diameter *S.aureus* 0,8-1,0 μm dan diameter *B.subtilis* 0,25–1,0 μm), sehingga *S.aureus* memiliki dinding sel yang lebih luas dan tebal, hal tersebut mengakibatkan daya serap oleh dinding sel lebih baik.

Inkubasi 45 hari menunjukkan persentase penurunan logam berat Pb pada sedimen limbah tekstil relatif stabil, hal ini dikarenakan jumlah mikroba yang semakin berkurang karena terjadi kompetisi untuk mendapatkan nutrisi sehingga kemampuan reduksi logam oleh mikroba mulai tidak efektif(Charlena, 2010).

Mikroba indigen dapat tumbuh pada media tercemar logam berat karena dapat mengakumulasi logam berat kedalam dinding selnya. Ion logam bermuatan positif, sehingga secara elektrostatik akan terikat pada permukaan sel. Interaksi antara ion logam dan dinding sel bakteri *Bacillus* sp., menunjukkan adanya peranan gugus karboksil pada peptidoglikan dan gugus fosforil pada polimer sekunder asam teikoat dan teikuronat (Solikha & Dwianita, 2013).

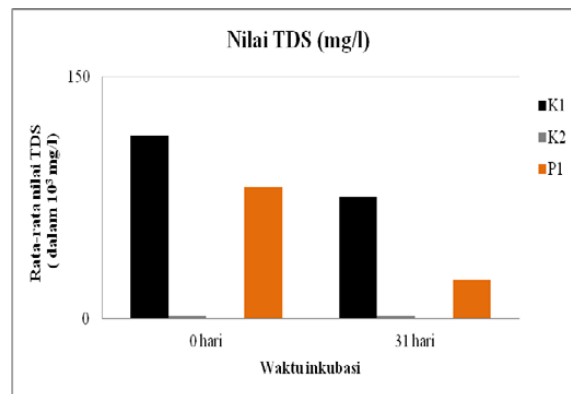
Mekanisme penyerapan logam oleh bakteri indigen adalah *active uptake*. Mekanisme ini terjadi secara bersamaan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan mikroorganisme (akumulasi intraseluler ion logam). Bakteri yang resisten (tahan) terhadap logam berat disebabkan kemampuan untuk mendetoksifikasi pengaruh logam berat dengan adanya protein atau materi granuler (Adi & Nana, 2010).

Uji Kemampuan Isolat *Bacillus* sp. dalam Mendegradasi Limbah Tangki Septik. Biodegradasi limbah tangki septik pada penelitian ini dilaksanakan menggunakan isolat *Bacillus* sp. dengan parameter pH, TSS, TDS dan viabilitas mikroorganisme. TSS adalah jumlah zat padat yang tersuspensi dalam air limbah yang tersaring oleh membran filter, dimana semakin kecil penurunan nilai TSS menunjukkan semakin kecil proses biodegradasi limbah yang terjadi. Nilai TSS awal pada K1 dan P1 secara berturut-turut adalah 499 mg/l dan 504 mg/l yang bernilai lebih tinggi apabila dibandingkan dengan K2 (58 mg/l) (Gambar 8).



Gambar 8. Grafik perubahan nilai TSS selama masa inkubasi (Ayu dan maya, 2013).

TDS merupakan jumlah zat padat terlarut yang berukuran $\leq 1 \mu\text{m}$, dimana semakin besar peningkatan nilai TDS mengindikasikan pada bahan organik limbah belum tergedradasi sempurna menjadi gas. Nilai TDS awal pada K1 dan P1 secara berturut turut 113867 mg/l dan 81667 mg/l yang bernilai lebih tinggi dari K2 (2200 mg/l) (Gambar 9).



Gambar 9. Grafik perubahan nilai TDS selama masa inkubasi (Ayu dan maya,2013).

Berdasarkan Gambar 8 dan 9, menunjukkan bahwa nilai TSS awal pada K1 dan P1 secara berturut-turut adalah 499 mg/l dan 504 mg/l. Nilai tersebut lebih tinggi dari nilai TSS pada K2 (58 mg/l). Hal ini berarti nilai TSS K1 dan P1 mengandung bahan organik yang berasal dari limbah tangki septik. Sedangkan, K2 adalah air keran yang tidak disterilisasi diduga hanya mengandung bahan mineral. Setelah diinkubasi selama 31 hari, terlihat adanya penurunan nilai TSS pada K1, K2 dan P1.

Adanya aktivitas mikroorganisme indigenous pada limbah tangki septik diasumsikan dapat menyebabkan terjadinya penurunan nilai TSS pada K1 menjadi 370 mg/l. Sedangkan penurunan nilai TSS pada K2 terjadi diduga karena adanya faktor pengendapan partikel di bagian dasar bioreaktor dan terjadi proses dekomposisi partikel tersuspensi menjadi partikel terlarut dengan nilai 36 mg/l. Selanjutnya, penurunan nilai TSS secara signifikan menjadi 205 mg/l pada P1 disebabkan oleh adanya peningkatan isolat *Bacillus* sp. Hal ini menunjukkan bahwa adanya peningkatan aktivitas mikroorganisme dalam mendegradasi bahan organik yang terkandung dalam limbah tangki septik.

Berdasarkan Gambar 8, dapat dilihat bahwa nilai TDS awal pada K1 dan P1 secara berturut turut 113867 mg/l dan 81667 mg/l dan lebih tinggi dari K2 (2200 mg/l). Setelah 31 hari masa inkubasi, terjadi penurunan nilai TDS pada K1 dan P1. Sedangkan pada K2 nilai TDS cenderung tidak mengalami penurunan. Penurunan nilai kandungan TDS terjadi karena partikel terlarut telah terkonversi ke dalam bentuk gas dan dikeluarkan sebagai hasil samping proses biodegradasi oleh mikroorganisme. Sebab, partikel berukuran lebih kecil yang terlarut di dalam air limbah akan melalui fase metanogenik, sehingga partikel tersebut akan dikonversikan dalam bentuk gas. Sementara itu, pada K2 tidak mengalami penurunan nilai TDS yang mengindikasikan bahwa tidak terjadinya proses dekomposisi partikel terlarut.

Uji Potensi Bakteri *Bacillus* sp. dalam Mendegradasi Plastik. Metode kuantitatif yang paling mudah untuk mengukur terjadinya biodegradasi suatu polimer adalah dengan menentukan kekurangan berat dan degradabilitas polimer. Kekurangan berat ditentukan dengan menghitung selisih berat potongan plastik setelah 3 bulan masa inkubasi (Tabel 1).

Tabel 1. Persentase kehilangan berat plastik oleh *Bacillus* sp. (Marjayandari, 2015)

Inokulum	Plastik	Persen Kehilangan Berat Plastik		
		Minggu 6	Minggu 9	Minggu 12
Kontrol		0% b	0% b	0% b
<i>Bacillus</i>	Hitam	6% a	7% a	8% a
	Putih	3% a	4% a	5% a
	Trans	4% a	5% a	7% a

Keterangan : Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji Tukey ANOVA dengan tingkat kepercayaan 0,05

Pada Tabel 1 dapat diketahui bahwa persentase kehilangan berat kering pelastik mengalami peningkatan pada setiap minggunya. Hal ini dapat menguatkan asumsi bahwa agen biodegradasi yang berperan adalah isolat *Bacillus* dimana pada minggu 6 dan 12 diduga merupakan fase adaptasi isolat uji untuk melakukan proses degradasi dari total 4 bulan masa inkubasi yang dilakukan. Pada plastik hitam, isolat *Bacillus* mampu mendegradasi plastik lebih tinggi dibandingkan dengan plastik putih dan transparan, yaitu pada minggu 12 setelah masa inkubasi biodegradasi mencapai 8%. Plastik hitam memiliki tingkat persentase kehilangan berat plastik lebih tinggi jika dibandingkan dengan plastik putih dan transparan. Hal ini diduga karena bakteri uji mendegradasi molekul yang bukan merupakan molekul asli dari plastik uji karena tertutupnya molekul asli plastik oleh molekul polimer zat-zat tambahan yang adanya pada plastik hitam. Menurut BPOM (2013), kantong kresek yang beredar di pasaran tergolong kedalam plastik daur ulang yang berbahaya karena ditambahkan zat pewarna berlebihan contohnya kantong plastik hitam. Penambahan adanya bahan aditif dan proses daur ulang menambah tingkat kejenuhan molekul sehingga bakteri susah untuk melakukan degradasi. Hal ini juga menunjukkan bahwa bakteri *Bacillus* sp. mampu menggunakan polimer plastik sebagai sumber karbon, sehingga bakteri mampu membelah diri.

Uji Peranan Bakteri Indigenus dalam Degradasi Limbah Cair Pabrik Tahu. Penurunan kadar terbaik ditemukan pada perlakuan C dengan menambahkan bakteri R3 dan R7 karena dapat menurunkan parameter uji lebih banyak dibandingkan dengan

perlakuan yang lain. Perlakuan tersebut dapat menurunkan COD \pm 1%, BOD5 \pm 23%, TSS 8,1%, Amilum 34%, N-Total 8,9% , namun menaikkan TDS sebanyak 21 % (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil Analisis akhir parameter uji (Ken,2019)

Perlakuan	% Penurunan dan kenaikan uji					
	CO D	BOD 5	TSS	T DS	Karbohi drat (Amilu m)	N- Total
Kontrol	+ 4%	20%	9%	+2 1 %	+4,3%	+19%
A	1%	33%	2,9%	+2 1 %	+1,9%	12%
B	1%	9%	6%	+2 1 %	46%	5,2%
C	1%	23%	8,1%	+2 1 %	34%	8,9%

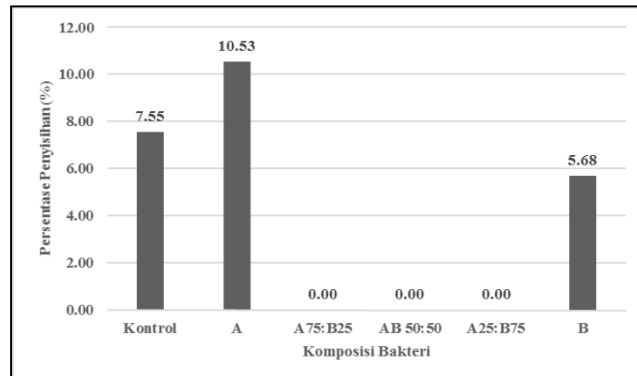
Keterangan: + = terjadi kenaikan kadar parameter uji

Kadar COD dan BOD5 pada perlakuan yang diberikan menunjukkan hasil yang masih berada di atas kadar maksimum standar mutu Peraturan Gubernur DIY No.7 Tahun 2010, walaupun begitu konsentrasi dari kedua parameter mengalami penurunan.

Konsentrasi TSS pada limbah cair tahu menurun setelah diberi perlakuan. Penambahan bakteri pada perlakuan C mampu menurunkan kadar TSS yang paling banyak dibandingkan perlakuan lain. Penurunan kadar TSS yang terjadi belum memenuhi standar mutu Peraturan Gubernur DIY No.7 Tahun 2010 dimana kadar maksimum TSS adalah 75 mg/L, tetapi konsentrasinya terus menurun dapat terjadi karena proses degradasi mikroba pada limbah cair tahu. Padatan tersuspensi menjadi bentuk terlarut sehingga nilai TSS menjadi berkurang. Kadar karbohidrat pada perlakuan kontrol dan perlakuan A mengalami peningkatan selama uji, hal ini dapat terjadi karena pada hari sebelum diberikan perlakuan masih terdapat senyawa kompleks lain yang belum terpecah menjadi amilum (senyawa sederhana lain) dan selama proses biodegradasi setelah diberikan perlakuan senyawa kompleks tersebut baru terdegradasi menjadi amilum sehingga kadar amilum pada limbah cair tersebut meningkat. Pada perlakuan B dan C mengalami penurunan kadar karbohidrat saat proses biodegradasi, hal ini dapat terjadi karena proses degradasi amilum oleh mikroba yang menghasilkan senyawa yang lebih sederhana dan digunakan oleh mikroba sebagai sumber energi untuk proses degradasi senyawa organik lainnya dan untuk metabolisme (Pohan, 2008).

Uji Kemampuan Bakteri *Azotobacter S8* dan *Bacillus subtilis* untuk Menyisihkan Trivalent Chromium (Cr³⁺) pada Limbah Cair. Hasil uji kemampuan penyisihan menunjukkan bahwa persentase penyisihan tertinggi adalah 10,53% oleh *Azotobacter S8* dan persentase terendah adalah 0% oleh semua bakteri konsortium dengan

waktu uji adalah 4 jam. Sedangkan persentase penyisihan untuk *Bacillus subtilis* adalah 5,68% (Gambar 10).



Gambar 10. Persentase Penyisihan Logam Berat Kromium oleh Bakteri (Fauzul, 2016).

Bacillus subtilis mampu menyingkirkan logam kromium hingga 95,19% dengan konsentrasi awal 100 mg/L dengan waktu inkubasi selama 24 jam dan pH optimum 7. Pada umumnya lama waktu yang digunakan untuk inkubasi bakteri pada logam berat kromium adalah 24 jam, 72 jam, dan 96 jam. Kemampuan bakteri dalam melakukan mekanisme detoksifikasi ekstraseluler juga terjadi akibat adanya interaksi logam kromium dengan gugus hidroksil pada selulosa yang melapisi dinding sel bakteri. Azotobacter juga memproduksi enzim katalase dan enzim reduktase. Enzim tersebut dimanfaatkan untuk memecah senyawa berbahaya yang masuk ke sel bakteri serta mengurangi kadar toksisitas suatu pencemar utamanya logam berat.

Pengaruh Isolat *Pseudomonas* Sp. Dan *Bacillus* sp. Dengan Biostimulasi Kompos Jerami Padi (*Oryza Sativa* L.) Terhadap Penurunan Total Petroleum Hidrokarbon Tanah Tercemar Oli Bekas. Penurunan TPH pada hari ke 15. Penurunan yang paling tinggi adalah adalah P6 (*Bacillus* + Konsentrasi kompos 20g) dengan persen degradasi 69.33%, P9 (Konsorsium *Bacillus* dan *Pseudomonas* +Konsentrasi kompos 20g) dengan persendegradasi 65.33% dan P3 (*Pseudomonas* +Konsentrasi kompos 20g) dengan persen degrassi 65.66%.

Tabel 3. Rata-rata persentase penurunan TPH pada hari ke 30 (%) (Fransisco, 2017).

Jenis Bakteri	Konsentrasi Kompos		
	10 g	15 g	20 g
<i>Pseudomonas</i>	86.00	89.00	92.00
<i>Bacillus</i>	86.00	92.00	93.67
Konsorsium	83.00	86.67	90.00

Hasil penelitian dapat diketahui bahwa bahan organik menunjukkan pengaruh yang baik untuk digunakan sebagai sumber nutrisi bagi bakteri pendegradasi hidrokarbon. Uji kemampuan kemampuan formula konsorsium mikroba dalam mendegradasi hidrokarbon menunjukkan bahwa Konsorsia III (*Pseudomonas* sp, BMC6, *Bacillus cereus*, BMC2, dan *Aspergillus niger*, FMC6), mampu mendegradasi minyak bumi dalam persentase 89,10%

pada minggu ke-5 waktu inkubasi. Hal ini disebabkan dalam keadaan bersama diantara isolat terjadi interaksi sinergisme untuk memproduksi enzim yang dapat memecah struktur hidrokarbon. Hal ini juga disebabkan formula konsorsium memproduksi enzim yang beragam. Adanya variasi tingkat penguraian dan jumlah enzim yang lebih banyak akan mengakibatkan penguraian berlangsung dengan baik.

Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Fanani (2014) yang melakukan degradasi tanah lahan subotimal oleh *Bacillus mycoides* indigenous. Penelitian tersebut menunjukkan terjadi penurunan TPH selama 39,48% selama 14 hari inkubasi. Persen penurunan ini membuktikan bahwa hasil yang didapatkan merupakan tingkat degradasi yang baik pada 15 hari inkubasi.

Degradasi dan Bioremediasi Bahan Pencemar Oleh mikroorganisme.

Degradasi merupakan mekanisme yang melibatkan perubahan fisik atau kimia dalam polimer akibat faktor lingkungan seperti cahaya, panas, kondisi kimia atau aktivitas biologis (Tarr, 2003), sedangkan biodegradasi menurut Das dan Dash (2014) adalah senyawa kimia yang dihasilkan oleh mikroorganisme terutama oleh bakteri. Melalui proses biodegradasi, bahan-bahan organik dapat terdegradasi secara aerobik dan anaerobik. Pada umumnya hasil proses degradasi mengakibatkan perubahan sifat polimer seperti menghasilkan potongan ikatan polimer, transformasi atau terbentuknya ikatan struktur kimia baru. Menurut Premraj dan Doble (2005), degradasi polimer dapat terjadi pada kondisi aerob dan anaerob. Pada kondisi aerob, produk degradasi yang dihasilkan adalah karbondioksida dan air, sedangkan degradasi pada kondisi anaerob dihasilkan karbondioksida, air dan metana atau H_2S .

Degradasi oleh mikroba adalah salah satu strategi utama yang digunakan untuk bioremediasi senyawa organik. Keberlangsungan proses bioremediasi tergantung pada potensi degradasi dan transformasi mikroorganisme. Keunikan metode bioremediasi adalah karena faktanya dapat menghilangkan pencemar dari lingkungan alam atau mengurangi polutan menggunakan komunitas mikroba indigenous yang tersedia di alam menurut Shah dkk., (2008) dan Ghosh dkk (2013).

SIMPULAN

Kesimpulan yang didapat dari review jurnal ini adalah bakteri *Bacillus* mampu meremediasi berbagai macam bahan pencemar, yaitu diantaranya limbah plastik, limbah industri, dan minyak solar. Bakteri ini mampu mendegradasi bahan pencemar tersebut karena memiliki enzim hidrokarbon yang akan memecah senyawa kimia berbahaya pada bahan pencemar menjadi senyawa yang lebih sederhana yang bisa dipakai sebagai sumber energi.

DAFTAR RUJUKAN

- Adi, S Erwin. dan Nana, Dyah S. (2010). Pengurangan Konsentrasi Ion Pb dalam Limbah Air Elektroplating dengan Proses Biosorpsi dan Pengadukan. *Jurnal Teknik Kimia*, 5(1).
- Ali, A. (2005). *Mikrobiologi Dasar Jilid 1*. State University of Makassar Press. Makassar.

- Bhaktinagara, A Reza. dkk. (2015). Biodegradasi Senyawa Hidrokarbon Oleh Strain *Bacillus cereus*(VIC) Pada Kondisi Salinitas Yang Berbeda. *Jurnal Biologi*, 4(3).
- Charlena. (2010). Bioremediasi Tanah Tercemar Limbah Minyak Berat Menggunakan Konsorsium Bakteri. *Disertasi*. Bogor : IPB
- Das, S and Dash, H.R. (2014). *Microbial Bioremediation: A Potential Tool for Restoration of Contaminated Areas-Microbial Biodegradation and Bioremediation*. Edited by Surajit Das. Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-800021-2.
- Effendi, H. (2003). Telaah Kualitas Air bagi Pengelolaan Sumber Daya dan Lingkungan Perairan Cetakan Kelima. Kanisius. Yogyakarta.
- Fransisco, P, Sandi dan D. Handayani. (2017). Pengaruh Isolat *Pseudomonas* Sp. Dan *Bacillus* sp. Dengan Biostimulasi Kompos Jerami Padi (*Oryza Sativa* L.) Terhadap Penurunan Total Petroleum Hidrokarbon Tanah Tercemar Oli Bekas. *Journal Biosains*, 1(2).
- Ghosh SK, Pal S, Ray S. (2013). Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environ Sci Pollut Res Int*. 20: 4339-4355.
- Hasyimuddin, dkk. (2016). Isolasi Bakteri Pendegradasi Minyak Solar Dari Perairan Teluk Pare-Pare. *Jurnal Ilmiah Biologi*, 4(1).
- Kim, H. B dan M. G, Gadd. (2008). *Bacterial Physiology and metabolism*. Cambridge university press. New York
Konig, H and J. Frohlich. 2009. *Biology of Microorganisms on Grapes, in Must and in Wine*. Springer- Verlag. Berlin
- Ken, R, Retno, dkk. (2019). Peranan Bakteri Indigenus dalam Degradasi Limbah Cair Pabrik Tahu. *Biota*, 4(1).
- Krisnawati, T.Y. Widya, A. Nurasih dan A. M. Santoso. (2015). Perancangan Moolief Bioreactor Untuk Remediasi Air Sungai Brantas Kediri Tercemar Limbah Domestik dan Industri. *Prosiding Biologi Nasional*. 496-503.
- Margesin, R, dan F. Schinner. (2001). Biodegradation and Bioremediation of Hydrocarbons in Extreme Environments. *Appl Microbiol Biotechnol*. 56:650–66
- Marjayandari, L dan M. Shovitri. (2015). Potensi Bakteri *Bacillus* sp. dalam Mendegradasi Plastik. *Jurnal Sains Dan Seni Its*, 4(2).
- Maulana, A, dkk. (2017). Bioremediasi Logam Pb pada Limbah Tekstil dengan *Staphylococcus aureus* dan *Bacillus subtilis*. *Indo. J. Chem. Sci*, 6(3).
- Premraj R, Doble M. (2005). Biodegradation of polymers. *Indian J Biotechnol*, 4:186-193.
- Retnosari, A Andarini dan Maya S. (2013). Kemampuan Isolat *Bacillus* sp. dalam Mendegradasi Limbah Tangki Septik. *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 2(1).

- Shah A.A., Hasan F, Hameed A, Ahmed S. (2008). *Biological degradation of plastics: a comprehensive review*. *Biotechnol Adv* 26: 246-265.
- Sholikhah, U. & K.N. Dwianita. (2013). Uji Potensi Genera *Bacillus* sebagai Bioakumulator Merkuri. *Jurnal ITS Surabaya*, 1(1): 1-9.
- Sudrajat, Anang, dkk. (2015). Isolasi dan Aplikasi Mikroba Indigen Pendegradasi Hidrokarbon dari Tanah Tercemar Minyak Bumi. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah*. Pusat Sains dan Teknologi. BATAN.
- Tarr, M.A. (2003). *Chemical Degradation Methods for Wastes and Pollutants: Environmental and Industrial Applications (Environmental Science & Pollution)* *Publisher: CRC Press. ISBN: 0824743075 / 9780824743079*
- Wignyanto, dkk. (2009). Bioremediasi Limbah Cair Sentra Industri Tempe Sanan Serta Perencanaan Unit Pengolahannya (Kajian Pengaturan Kecepatan Aerasi Dan Waktu Inkubasi). *Jurnal Teknologi Pertanian*, 10(2).
- Zainuddin, A Riza. (2018). Mikoremediasi Menghilangkan Polusi Logam Berat pada Lahan Bekas Tambang untuk Lahan Peternakan. *Wartazoa*, 28(1).