

Pemanfaatan Bakteri *Bacillus Cereus* pada Proses Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi dengan Metode *Slurry Bioreactor*

Abubakar Tuhuloula¹, dan Sri Rachmania Juliastuti^{2*}

Abstrak— Kegiatan eksplorasi dan produksi minyak bumi sangat berpotensi mencemari lingkungan. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mengatasi pencemaran minyak bumi adalah dengan metode bioremediasi yang menggunakan mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa berbahaya menjadi tidak berbahaya. Penelitian ini bertujuan mempelajari pengaruh konsentrasi bakteri *Bacillus Cereus* pada penurunan konsentrasi TPH (*Total Petroleum Hydrocarbon*) pada bioremediasi lahan terkontaminasi minyak bumi. Metode penelitian menggunakan tiga tahapan utama yaitu peremajaan isolat bakteri *Bacillus cereus*, preparasi tanah, dan proses bioremediasi. Residu hidrokarbon minyak bumi diukur dengan metode gravimetri. Hasil identifikasi selama tujuh minggu menunjukkan, bakteri *Bacillus cereus* dengan konsentrasi 5%(v/v), 10%(v/v), 15%(v/v) dan tanpa penambahan bakteri, pada minggu ke-0 kadar TPH pada tanah berturut-turut adalah 51.000 µg/g, 49.000 µg/g, 50.000 µg/g dan 46.000 µg/g; dan pada minggu ke-7 mampu menurunkan kadar total petroleum hidrokarbon berturut-turut adalah 15000 µg/g, 7000 µg/g, 7000 µg/g, dan 27000 µg/g, dengan persen biodegradasi 69,39%; 86%; 84,78% dan 47,06%. Konsentrasi BTEX akhir untuk penambahan bakteri 5% (v/v), benzen yang terdegradasi adalah 0,635 mg/L, toluen adalah 20,067 mg/L, etilbenzen adalah 1,428 mg/L dan xilen adalah 0,469 mg/L, dengan % biodegradasinya untuk benzen 98,09%; toluen 49,56%; etilbenzen 84,15%; dan xilen 96,14%. Pada penambahan bakteri 10% (v/v), degradasi benzen adalah 0,565 mg/L, etilbenzen adalah 0,649 mg/L dan xilen adalah 0,459 mg/L, dengan % biodegradasinya untuk benzen 98,29%; etilbenzen 92,79% dan xilen 96,22%, serta pada penambahan bakteri 15% (v/v), dapat mendegradasi benzen sampai 0,496 mg/L, dan xilene adalah 0,444 mg/L, dengan % biodegradasinya untuk benzen 98,51% dan xilen 96,34%. Model kinetika biodegradasi oleh bakteri, untuk bioreaktor 5% (v/v) didapat $Y = 1,745$ mg biomass/mg substrate, $k_d = 0,028$ hari⁻¹; $k_o = -0,128$ hari⁻¹ dan $K_m = 1745201$ mg/L. Untuk bioreaktor 10% (v/v) nilai $Y = 1,634$ mg biomass/mg substrate, $k_d = 0,041$ hari⁻¹; $k_o = 0,318$ hari⁻¹ dan $K_m = 44501,6$ mg/L. Sedangkan untuk bioreaktor 15% diperoleh nilai $Y = 2$ mg biomass/mg substrate, $k_d = 0,032$ hari⁻¹; $k_o = 0,941$ hari⁻¹ dan $K_m = 81200$ mg/L.

Kata kunci— bioremediasi, crude oil, slurry bioreactor, *Bacillus cereus*, dan total petroleum hidrokarbon (TPH).

I. PENDAHULUAN

Minyak dan gas bumi sampai saat ini masih merupakan sumber energi yang menjadi pilihan utama untuk digunakan pada industri, transportasi dan rumah tangga. Selain itu, pemanfaatan berbagai produk akhir atau produk-produk turunan minyak bumi juga semakin meningkat sehingga peningkatan akan permintaan minyak dan gas bumi di seluruh dunia telah mengakibatkan pertumbuhan dan ekspansi pada kegiatan eksplorasi dan pengolahan minyak mentah di berbagai negara, termasuk Indonesia. Namun demikian, kita selalu dihadapkan pada dilema antara peningkatan produksi dengan pelestarian sumberdaya alam lingkungan serta dampak yang ditimbulkan dari proses produksi tersebut.

Indonesia adalah salah satu negara penghasil minyak bumi terbesar (urutan ke-8 dari negara penghasil minyak dunia) dengan produksi sebesar 1,27 juta barel per hari pada tahun 2003. Dari angka tersebut diperkirakan akan menimbulkan 150 ribu ton limbah per tahun, 37.500 ton diantaranya diperkirakan adalah limbah B3 (Santosa, 2004 dalam Nugroho, 2006). Jumlah tanah yang terkontaminasi minyak bumi yang dihasilkan dalam proses produksi minyak telah meningkat ribuan ton setiap tahun di Indonesia (Yudono et al., 2009).

Penanganan kondisi lingkungan yang tercemari minyak bumi dapat dilakukan melalui metode fisika, kimia, dan

hayati. Penanganan secara kimia dan fisika merupakan cara penanganan cemaran minyak bumi yang membutuhkan waktu yang relatif singkat, tetapi metode ini dapat menyebabkan kerusakan lingkungan. Metode fisika yang dapat digunakan ialah dengan mengambil kembali minyak bumi yang tumpah dengan *oil skimmer*. Metode ini dapat dilakukan jika minyak bumi yang tumpah belum menyebar kemana-mana. Jika minyak bumi telah mengendap dan menyebar sulit dilakukan dengan metode ini (Prince et al., 2003).

Mengingat dampak pencemaran minyak bumi baik dalam konsentrasi rendah maupun tinggi cukup serius, maka manusia terus berusaha untuk mencari teknologi yang paling mudah, murah dan tidak menimbulkan dampak lanjutan. Menurut Harayama (1995) dari segi biaya dan kelestarian, bioremediasi lebih murah dan berwawasan lingkungan dibandingkan dengan metode pemulihan lingkungan baik secara fisik maupun kimiawi.

Teknologi bioremediasi yaitu menggunakan bakteri yang dalam aktivitasnya mampu memanfaatkan hidrokarbon minyak bumi sebagai sumber karbon dan energi kemudian mengubahnya menjadi CO₂, H₂O dan biomassa sel. Bioremediasi bukan hanya dapat diaplikasikan pada lingkungan yang tercemar minyak bumi, tetapi juga dapat diterapkan untuk mengendalikan pencemaran oleh bahan-bahan berbahaya lainnya seperti pestisida dan senyawa xenobiotik lainnya. Teknik

¹ Program Studi Teknik Kimia Universitas Lambung Mangkurat Banjarmasin. Email: Abubakarkulur@yahoo.com

² Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya, 60111, Indonesia. Email: juliaz30@chem-eng.its.ac.id

bioremediasi lebih ekonomis dibanding remediasi termal dan *physico-chemical* seperti *incenerator* (Robles et al., 2008).

Berdasarkan konsep pengembangan desain bioremediasi dapat dilakukan secara *in situ*, *ex situ* ataupun kombinasinya. Bioremediasi *in situ* adalah suatu proses bioremediasi yang hanya mengandalkan kemampuan mikroorganisme *indigenous* yang telah ada di lingkungan tercemar limbah untuk mendegradasinya. Bioremediasi *ex situ* merupakan proses bioremediasi yang dilakukan dengan cara memindahkan kontaminan ke suatu tempat untuk memberikan beberapa perlakuan.

II. KINETIKA REAKSI PROSES KONTINYU

Secara umum, neraca massa makroskopik di sekitar aliran reaktor ditunjukkan oleh Persamaan 1.

Laju akumulasi dalam reaktor = laju masuk – laju keluar + laju reaksi (1)

Neraca massa biomassa ditunjukkan oleh Persamaan 2.

$$V \frac{dX}{dt} = Q^o X^o - Q^o X + V(r_{f_b}) \quad (2)$$

Neraca massa substrat ditunjukkan oleh Persamaan 3.

$$V \frac{dS}{dt} = Q^o S^o - Q^o S + V(r_{f_s}) \quad (3)$$

Jika substrat dikonsumsi, laju pembentukan substrat adalah *inherently negative*. Pada kondisi *steady state*, neraca massa Persamaan 2 menjadi :

$$-(r_{f_s}) = \frac{Q^o}{V} (S^o - S) = \frac{S^o - S}{\theta} \quad (4)$$

Dimana Q^o = laju alir influent (liter/jam); S = konsentrasi substrat (ppm); S^o = konsentrasi awal (ppm); V = volume (liter); θ = waktu tinggal umpan (jam).

Untuk kasus kinetika Monod atau Michaelis-Menten dalam suatu reaktor yang tercampur sempurna, maka :

$$\text{Laju reaksi biomassa} = \frac{k_o X S}{(K_m + S)} - k_d X \quad (5)$$

$$\text{Laju reaksi substrat} = \frac{dS}{dt} = \frac{-k_o X S}{Y(K_m + S)} \quad (6)$$

Sehingga

$$-(r_{f_s}) = \frac{k_o}{Y} \left(\frac{X S}{K_m + S} \right) \quad (7)$$

Dengan : k = konstanta laju kinetika; k_d = laju konstanta *endogenous*; k_o = konstanta laju pertumbuhan maksimum; K_m = konsentrasi substrat jenuh (ppm). Setelah substitusi Persamaan 4 ke dalam Persamaan 7, hasilnya dapat ditulis seperti Persamaan 8.

$$\frac{\theta X}{S^o - S} = \left(\frac{K_m Y}{k_o} \right) \left(\frac{1}{S} \right) + \left(\frac{Y}{k_o} \right) \quad (8)$$

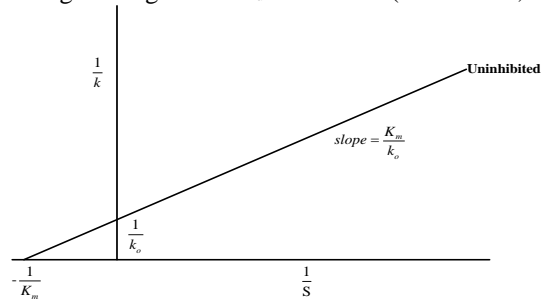
Karena $k = (S^o - S)Y/\theta X$ untuk reaktor alir pada kondisi *steady state* dan dengan tidak ada biomassa dalam umpan, maka :

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{K_m}{k_o} \right) \left(\frac{1}{S} \right) + \left(\frac{1}{k_o} \right) \quad (9)$$

K_m dan k_o ditentukan dari nilai slope dan intersep seperti ditunjukkan dalam Gambar 1, yang mana biasanya mengacu pada *Lineweaver-Burk plot*. Jika mengkombinasikan Persamaan 3, 4, 5, dan 7 untuk reaktor *steady state* tanpa biomassa masuk akan diperoleh bentuk linier sesuai Persamaan 10 yang dapat digunakan untuk menghitung k_d dan Y .

$$\frac{S^o - S}{X} = \frac{k_d \theta}{Y} + \frac{1}{Y} \quad (10)$$

Dengan plot $(S^o - S)/X$ versus θ , slope dan intersep masing-masing adalah k_d/Y dan $1/Y$ (Soundtrom, 1979).



Gambar 1. Plot Lineweaver-Burk untuk kinetika

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari pengaruh konsentrasi TPH (*Total Petroleum Hydrocarbon*) dan konsentrasi bakteri *Bacillus cereus* pada bioremediasi lahan terkontaminasi minyak bumi serta menghitung parameter kinetik bakteri *Bacillus cereus* pada bioremediasi lahan terkontaminasi minyak bumi. Manfaat yang bisa diperoleh dari penelitian ini antara lain memberikan alternatif teknologi pengolahan limbah dengan sistem bioreaktor yang memanfaatkan mikroba sebagai pereduksi bahan berbahaya dalam minyak bumi sehingga dapat mengatasi pencemaran lingkungan akibat tumpahan minyak bumi, memberikan manfaat penerapan teknik bioremediasi di bidang pengelolaan lingkungan dan mendapatkan data-data kinetika yang selanjutnya bisa digunakan untuk merancang bioreaktor.

III. PROSEDUR PENELITIAN

A. Persiapan Bahan

a. Pengembangan Kultur

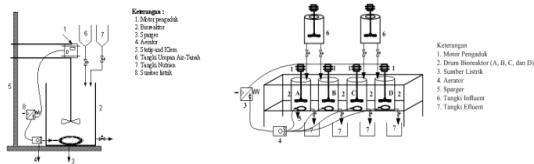
Melarutkan 40 gr nutrisi agar dalam 1 liter aquades dan mendidihkan campuran hingga semua larut, kemudian memasukkan larutan dalam tabung reaksi masing-masing 5 ml, kemudian menutup mulut tabung reaksi dengan kapas. Mensterilisasi dalam *autoclave* pada suhu 121°C selama 15 menit, kemudian mendinginkannya dengan posisi miring.

b. Peremajaan Isolat Bakteri *Bacillus Cereus*

Peremajaan isolat bakteri *Bacillus cereus* dilakukan pada media cair (kaldu cair). 1 liter aquades ditambahkan 3 gr kaldu daging sapi dan 5 gr pepton, 5 gr glukosa dan 2 gr KH_2PO_4 . Media seperti tersebut diatas disaring kemudian disterilisasi dalam autoklaf selama 15 menit pada suhu 121°C, dan didinginkan. Setelah dingin, pemindahan bakteri dilakukan dari media agar miring dengan menggunakan ose secara aseptik. Kemudian media baru (*starter*) tersebut di inkubasi pada suhu 30°C selama 1 hari dan setelahnya dilakukan analisa populasi bakteri.

B. Bioslurry Reaktor

Preparasi dilakukan dengan cara mencampur tanah terkontaminasi minyak bumi dengan air (aquades) menggunakan perbandingan 1:9 kemudian diukur pH dan densitas slurry. Reaktor yang digunakan berjumlah empat buah yaitu reaktor A, B, C, dan D. Reaktor yang digunakan berupa drum silinder dengan volume 4 liter. Pada keempat reaktor dilengkapi dengan motor pengaduk dan sistem aerasi (*aerator* dan *sparger*) untuk proses bioremediasi dengan sistem bioslurry, sedangkan untuk reaktor A digunakan sebagai blanko.



Gambar 2. Skema peralatan

C. Prosedur Analisa

Pada proses bioremediasi, slurry yang berisi campuran tanah dan air dengan perbandingan 1:9 dimasukkan ke dalam reaktor bioslurry (A, B, C dan D). Kemudian sebanyak (5%, 10%, 15%) (v/v) *starter* dimasukkan ke dalam reaktor B, C, D dan dianalisa TPH awal. Pengadukan 100 rpm pada suhu ruang serta aerasi pada setiap bioreaktor tersebut. Sedangkan untuk reaktor A digunakan sebagai blanko, yang berisi tanah terkontaminasi minyak bumi saja tanpa perlakuan layaknya reaktor B, C, dan D. Secara periodik dilakukan pengukuran temperatur, pH, DO, MLSS dan MLVSS sesuai dengan ketentuan waktu pengukuran seperti tersebut diatas.

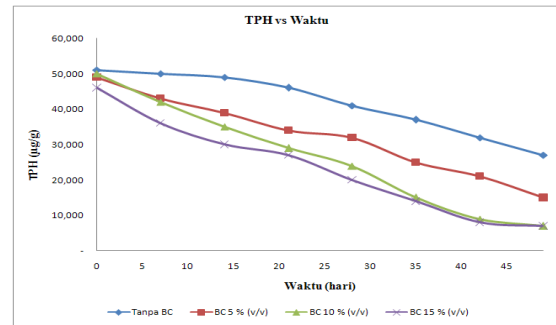
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Total Petroleum Hidrokarbon dan % Biodegradasi

Total Petroleum Hidrokarbon (TPH) adalah komponen yang paling mengganggu dalam tanah terkontaminasi minyak bumi karena berpotensi beresiko ke kesehatan manusia dan lingkungan. TPH adalah salah satu parameter keberhasilan proses bioremediasi sebelum dibuang ke lingkungan sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku. Nilai batas akhir hasil olahan TPH adalah 10000 $\mu\text{g/g}$ (KEPMEN LH no : 128 tahun 2003).

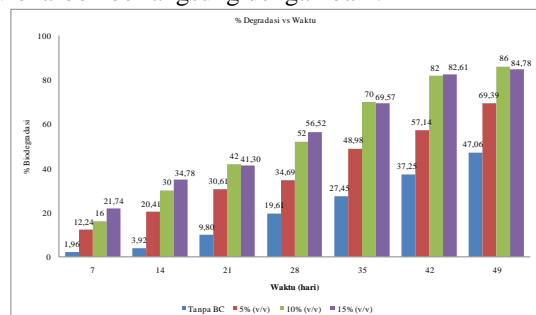
Gambar 3 menunjukkan penurunan konsentrasi *total petroleum hydrocarbon* pada lumpur minyak. Untuk bioreaktor A, perlakuan tanpa penambahan bakteri *Bacillus cereus* berfungsi sebagai blanko, tidak menunjukkan penurunan yang berarti. Penurunan nilai TPH pada minggu pertama sampai minggu terakhir (interval waktu dari ke-0 sampai hari ke-49) tidak terlalu signifikan yaitu dari 51000 $\mu\text{g/g}$ menjadi 27000 $\mu\text{g/g}$. Hal ini diduga bukanlah berasal dari bakteri tetapi terjadi karena adanya penguapan dari minyak tersebut. Hasil ini masih jauh dari yang dipersyaratkan. Pada bioreaktor B dengan penambahan bakteri *Bacillus cereus* 5% (v/v) menghasilkan penurunan nilai TPH pada setiap minggu cukup signifikan. Pada interval waktu dari hari ke-0 sampai hari ke-49, penurunan nilai TPH adalah 49000 $\mu\text{g/g}$ menjadi 15000 $\mu\text{g/g}$. Kenyataan ini menunjukkan bahwa, walaupun tanah sudah di tambahkan bakteri *Bacillus cereus* 5% (v/v), tetapi belum mampu

untuk mendegradasi hidrokarbon minyak bumi yang ada dalam tanah tersebut sampai batas amannya.



Gambar 3. Hubungan antara %TPH dengan waktu pengamatan

Untuk bioreaktor C pada penambahan bakteri *Bacillus cereus* 10% (v/v) menghasilkan penurunan nilai TPH pada setiap minggu sangat signifikan. Untuk minggu pertama, dengan interval waktu dari hari ke-0 sampai hari ke-7, penurunan nilai TPH dari 50000 $\mu\text{g/g}$ menjadi 42000 $\mu\text{g/g}$, sedangkan pada minggu terakhir pada hari ke-49 penurunan nilai TPH adalah sampai 7000 $\mu\text{g/g}$. Hasil TPH pada minggu terakhir menunjukkan bahwa nilai TPH sudah memenuhi persyaratan ketentuan. Kenyataan ini menunjukkan bahwa, dengan penambahan konsentrasi bakteri yang lebih besar, maka kemampuan bakteri untuk mendegradasi hidrokarbon minyak bumi akan lebih baik. Sedangkan pada bioreaktor D untuk penambahan bakteri *Bacillus cereus* 15% (v/v) menghasilkan penurunan nilai TPH pada setiap minggu sangat baik. Pada minggu pertama sampai minggu ke-7, penurunan nilai TPH adalah 46000 $\mu\text{g/g}$ menjadi 7000 $\mu\text{g/g}$, ini menunjukkan bahwa kinerja bakteri masih cukup baik dalam merombak tanah terkontaminasi minyak bumi. Perlakuan dengan penambahan konsorsium bakteri menunjukkan hasil penurunan TPH yang baik yang artinya degradasi hidrokarbon berlangsung dengan baik.



Gambar 4. Hubungan antara % biodegradasi dengan waktu pengamatan

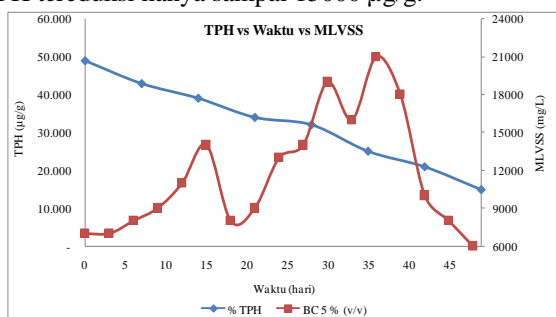
Gambar 4 menunjukkan bahwa pada perlakuan dengan penambahan bakteri 5% (v/v), 10% (v/v), 15% (v/v), menyebabkan nilai TPH dapat tereduksi cukup baik. Semakin besar nilai TPH mengalami penurunan, maka semakin besar pula % biodegradasinya meningkat. Hal ini bisa diketahui dengan meningkatnya % biodegradasi senyawa hidrokarbon dari interval hari ke-7 sampai dengan hari ke-49. Sedangkan pada perlakuan tanpa penambahan bakteri, walaupun nilai TPH mengalami penurunan, akan tetapi %biodegradasinya relatif lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan penambahan bakteri. Hal tersebut disebabkan karena bakteri alami

yang ada di dalam tanah belum berhasil mendegradasi senyawa hidrokarbon minyak bumi secara efektif. Diduga kelompok bakteri yang mendominasi tanah yang tercemar adalah kelompok mikroba *indigenous* yang tidak dapat memanfaatkan senyawa hidrokarbon minyak bumi untuk pertumbuhannya, sehingga laju degradasinya berlangsung lambat (Nugroho, 2006).

Biodegradasi sebagai proses penguraian oleh aktifitas mikroba yang mengakibatkan transformasi struktur suatu senyawa sehingga terjadi perubahan integritas molekular. Agar biodegradasi dapat berlangsung efektif, diperlukan kondisi lingkungan yang cocok untuk menunjang pertumbuhan dan perkembangan mikroba (Leisinger, 1981; Sheehan, 1997 dalam Nugroho, 2006).

B. Pengaruh MLVSS (*Mixed Liquor Volatile Suspended Solid*) dan Waktu

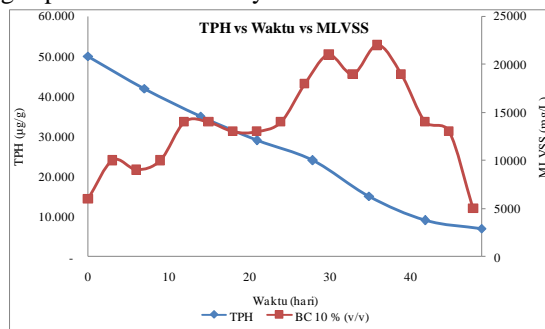
Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa pada bioreaktor bakteri 5% (v/v) untuk waktu dari 0 ke 3 hari pertama tidak terjadi perubahan pada nilai MLVSS, yaitu tetap 7000 mg/L. Kemungkinannya pada rentang waktu tersebut mikroorganisme yang ada, masih beradaptasi dengan lingkungannya, sedangkan pada hari ke-3 sampai ke-15 terjadi peningkatan nilai MLVSS sampai 14000 mg/L walaupun tidak terlalu signifikan, namun dengan terjadinya peningkatan pada nilai MLVSS ini mengakibatkan TPH tereduksi cukup signifikan. Pada hari ke-18, nilai MLVSS tereduksi sangat besar sampai 8000 mg/L, hal ini dapat terjadi karena suplay oksigen mengalami gangguan yang mana menyebabkan bakteri mengalami kematian. Untuk mengantisipasi, maka pemberian nutrisi diberikan sesuai dengan kebutuhannya. Selanjutnya nilai MLVSS mengalami peningkatan dari hari ke-21 sampai hari ke-30, dengan nilai MLVSS 19000 mg/L, namun pada hari ke-33, nilai MLVSS terkoreksi menjadi 16000 mg/L. Pada hari ke-36, MLVSS meningkat cukup signifikan yaitu 21000 mg/L, dan selanjutnya mengalami penurunan. Dengan adanya penurunan pada MLVSS-nya, akan mengganggu kinerja bakteri dalam menurunkan kadar TPH, dimana sampai akhir proses bioremediasi pada hari ke-49, nilai TPH tereduksi hanya sampai 15000 µg/g.



Gambar 5. Hubungan TPH, MLVSS dengan waktu untuk bakteri 5% (v/v)

Gambar 6 menunjukkan bahwa untuk bioreaktor bakteri 10% (v/v), waktu dari 0 ke 3 pada hari pertama terjadi peningkatan MLVSS, yaitu dari 6000 mg/L menjadi 10000 mg/L, namun pada hari ke-6 terjadi penurunan nilai MLVSS-nya menjadi 9000 mg/L. Selanjutnya nilai MLVSS cenderung mengalami fluktuasi. Seperti halnya pada bioreaktor dengan penambahan bakteri 5% (v/v),

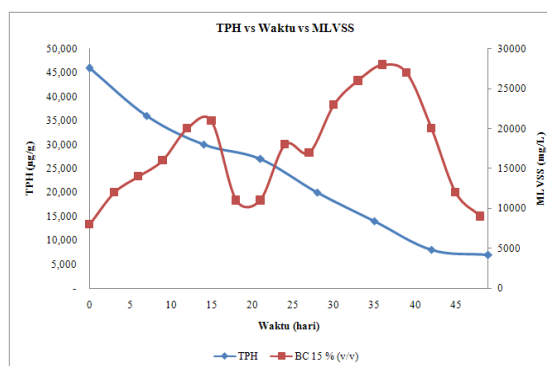
nilai MLVSS tereduksi sampai 13000 mg/l dari 14000 mg/L pada hari sebelumnya.



Gambar 6. Hubungan TPH, MLVSS dengan waktu untuk bakteri 10% (v/v)

Namun pada hari ke-24 sampai hari ke-30, MLVSS mengalami peningkatan walau tidak signifikan, yang juga mengakibatkan TPH tereduksi cukup signifikan, dan diakhir proses bioremediasi yaitu pada hari ke-49, nilai TPH tereduksi sampai 7000 µg/g, yang mana sesuai dengan disyaratkan.

Gambar 7 menunjukkan bahwa pada bioreaktor dengan penambahan bakteri *Bacillus cereus* 15% (v/v), untuk waktu dari 0 ke 3 pada hari pertama terjadi peningkatan nilai MLVSS cukup signifikan, yaitu dari 8000 mg/L menjadi 12000 mg/L, dan cenderung terus meningkat sampai hari ke-15 dengan MLVSS 21000 mg/L, namun seperti halnya pada bioreaktor 5% (v/v) dan 10% (v/v), pada hari ke-18 nilai MLVSS tereduksi sangat signifikan pula yaitu sampai 11000 mg/L dari 21000 mg/L pada hari sebelumnya. Selanjutnya MLVSS cenderung mengalami fluktuasi. Pada hari ke-30 MLVSS cukup baik mengalami peningkatan sampai 23000 mg/L, ini pula mengakibatkan TPH mengalami penurunan yang cukup signifikan. Dengan demikian, suatu indikasi yang menunjukkan keberhasilan dalam penurunan kadar TPH sangat tergantung dengan meningkatnya MLVSS dengan persediaan oksigen dan asupan nutrisi yang cukup.



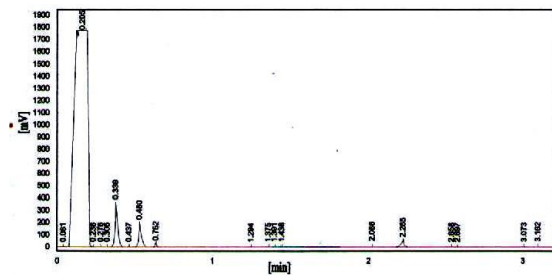
Gambar 7. Hubungan TPH, MLVSS dengan waktu untuk bakteri 15% (v/v)

C. BTEX (*Benzen, Toluene, Etilbenzen, Xilen*)

BTEX (*Benzen, Toluene, Etilbenzen, Xilen*), merupakan komponen senyawa hidrokarbon aromatik yang terkandung dalam minyak bumi. BTEX bersifat rekalsitran dan mutagenik (Atlas dan Bartha, 1998). Kontaminasi tanah oleh minyak bumi merupakan masalah yang kompleks, yang mana berhubungan dengan mobilitas komponen beracun di lingkungan seperti benzen, toluen, etilbenzen dan xilen. Senyawa-senyawa

BTEX yang ada di kilang dan limbah industri kimia, berpotensi memiliki polusi tinggi, karena sifat neurotoksik, karsinogenik dan teratogenik berisiko tinggi terhadap lingkungan dan kesehatan manusia.

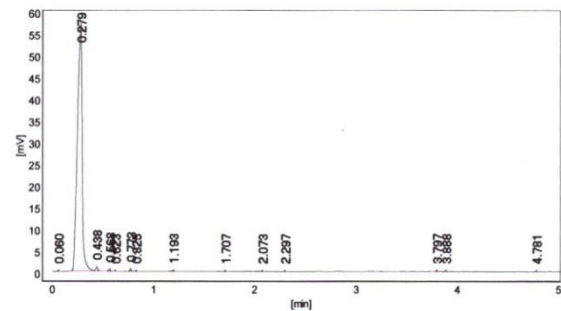
Pada Gambar 8, untuk analisa BTEX awal terlihat pada kromatogramnya bahwa benzen dengan waktu retensi 0,339 dan area 349709 memiliki kandungan konsentrasi benzen dalam tanah sebesar 33,23 mg/L. Untuk Toluena pada waktu retensi 0,480 dan area 214283 memiliki kandungan konsentrasi toluena dalam tanah sebesar 39,79 mg/L. Dan etilbenzen dengan waktu retensi 0,752 dan area 3961 pada kromatogramnya memiliki kandungan konsentrasi ethylbenzene dalam tanah sebesar 9,01 mg/L. Sedangkan untuk xilen terbaca di kromatogram pada waktu retensi 2,285 dan area 21952, hasil konsentrasi xilen dalam tanah sebesar 12,15 mg/L.



Gambar 8. Hasil analisa GC BTEX awal

Di antara mikroorganismenya yang ada dalam lokasi terkontaminasi, ditemukan bahwa mikroorganismenya mampu menggunakan kontaminan atau hanya menolak toksisitasnya (McNaughton et al., 1999). Menurut Harayama (1995), n-alkana dengan 10-16 atom karbon lebih mudah dipecah-pecah oleh mikroba bila dibandingkan dengan n-alkana dengan berat molekul rendah. Secara umum n-alkana yang mudah dan cepat terdegradasi adalah $C_{12} - C_{18}$, sedangkan diatas C_{18} lebih sulit dipecah sebab senyawa tersebut sukar larut.

Pada Gambar 9, untuk penambahan bakteri *Bacillus cereus* 5% (v/v) terlihat bahwa terjadi degradasi BTEX oleh bakteri sangat signifikan, yang mana untuk benzen sendiri pada waktu retensi 0,438 dan area 1554, dengan persamaan regresi untuk benzen, $y = 0,0000940x + 0,3502$, didapat konsentrasi benzen dalam tanah setelah hari ke-49 sebesar 0,635 mg/L. Pada toluena dengan waktu retensi 0,568 dan area 385, dengan persamaan regresi, $y = 0,0001804x + 1,1292$, konsentrasi toluena dalam tanah sebesar 20,067 mg/L. Dan etilbenzen terlihat pada kromatogram untuk waktu retensi 0,773 dan area 446, berdasarkan data kalibrasi etilbenzen dengan persamaan regresi, $y = 0,0021568x + 0,4663$, didapat konsentrasi etilbenzen dalam tanah sebesar 1,428 mg/L. Untuk xilen pada kromatogram terbaca untuk waktu retensi 1,193 dan area 153, berdasarkan data kalibrasi xilen dengan persamaan regresi, $y = 0,0005357x + 0,3873$, konsentrasi xilen akhir dalam tanah sebesar 0,469 mg/L.

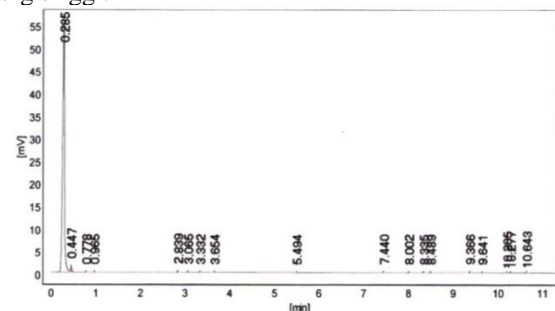


Gambar 9. Hasil GC BTEX untuk bioreaktor B dengan penambahan bakteri *Bacillus cereus* 5% (v/v)

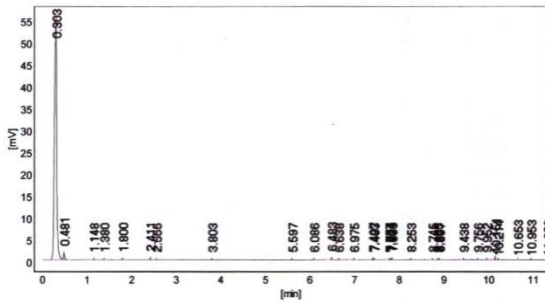
Hal ini menunjukkan bahwasanya bakteri *Bacillus cereus* yang ditemukan di tanah mampu memecah senyawa BTEX dalam tanah yang terkontaminasi minyak bumi untuk digunakan sebagai sumber energi, dengan mengurangnya dari lingkungan yang terkontaminasi. Aktivitas mikroba dalam mendegradasi tanah yang terkontaminasi minyak bumi dilakukan dengan memotong-motong komponen hidrokarbon yang ada menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya terhadap lingkungan, sehingga tanah yang tercemar minyak bumi tersebut akan memperlihatkan perubahan komposisi fraksi hidrokarbon penyusunnya (Sharpley, 1966 dalam Nugroho, 2006).

Pada Gambar 10, untuk penambahan bakteri *Bacillus cereus* 10% (v/v) terlihat bahwa BTEX terdegradasi sangat signifikan, yang mana untuk benzen sendiri pada waktu retensi 0,447 dan area 2290, dengan menggunakan regresi data kalibrasi didapat konsentrasi akhir benzen dalam tanah sebesar 0,565 mg/L. Pada etilbenzen terlihat pada kromatogram untuk waktu retensi 0,778 dan area 85, dengan menggunakan regresi data kalibrasi didapat hasil analisa menunjukkan konsentrasi etilbenzen dalam tanah sebesar 0,649 mg/L. Sedangkan untuk xilen pada kromatogram terbaca untuk waktu retensi 0,965 dan area 106, dengan menggunakan regresi data kalibrasi didapat konsentrasi xilen akhir dalam tanah sebesar 0,459 mg/L. Sedangkan untuk toluena yang tidak terdeteksi diperkirakan disebabkan oleh peralatan kromatografi gas yang kurang sensitif atau kelimpahannya yang sangat kecil hingga kurang dapat dideteksi dengan baik atau memang tidak terdapat sama sekali.

Hidrokarbon rantai pendek ($< C_{10}$) seperti benzen lebih sulit di degradasi daripada rantai panjang, karena cenderung bersifat toksik dibanding dengan toluena, etilbenzen dan xilen sebagai akibat dari daya larutnya yang tinggi.



Gambar 10. Hasil GC BTEX untuk bioreaktor C dengan penambahan bakteri *Bacillus cereus* 10% (v/v)



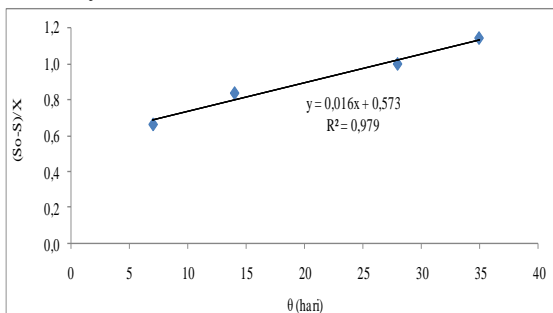
Gambar 11. Hasil GC BTEX untuk bioreaktor D dengan penambahan bakteri *Bacillus cereus* 15% (v/v)

Pada grafik 11, untuk penambahan bakteri *Bacillus cereus* 15% (v/v), benzen pada waktu retensi 0,481 dan area 3031, dengan menggunakan regresi data kalibrasi, $y = 0,0000940x + 0,3502$ didapat konsentrasi benzen dalam tanah sebesar 0,496 mg/L. Sedangkan untuk xylen pada kromatogram terbaca untuk waktu retensi 0,965 dan area 106, dengan menggunakan regresi data kalibrasi $y = 0,0005357x + 0,3873$ didapat konsentrasi xylen akhir dalam tanah sebesar 0,444 mg/L. Pembacaan pada grafik ini, terlihat bahwa toluen dan ethylbenzen tidak terbaca, hal sangat mungkin terjadi dikarenakan oleh kelimpahannya yang sangat kecil ataupun mungkin tidak ada sama sekali, sehingga kromatografi gas tidak dapat mendeteksi senyawa tersebut.

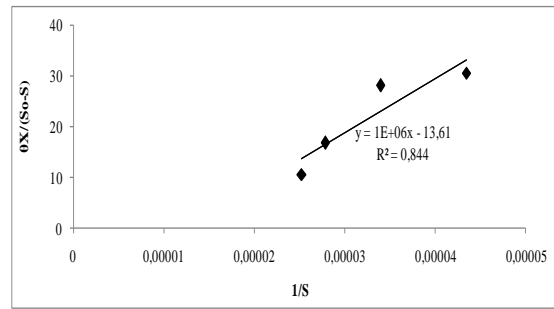
Mikroba-mikroba pendegradasi hidrokarbon bekerja dengan cara memotong-motong komponen hidrokarbon alifatik, olefin, aromatik, dan naftalen. Hidrokarbon dengan struktur alifatik, seperti alkana lebih mudah diserang oleh mikroba daripada struktur bercabang, hidrokarbon rantai panjang lebih mudah diserang oleh mikroba daripada rantai pendek, demikian pula hidrokarbon yang mempunyai ikatan tidak jenuh lebih mudah diserang oleh mikroba (Davis, 1967).

D. Kinetika Mikroba

Analisa TPH dilakukan dengan menggunakan metode ekstraksi gravimetri. Nutrien yang ditambahkan pada tanah yang tercemar untuk mendukung pertumbuhan awal bakteri *bacillus cereus* sebelum bakteri bisa mendegradasi hidrokarbon sebagai sumber metabolisme karbonnya.



Gambar 12. Hubungan $(S^0 - S)/X$ vs θ pada penambahan bakteri *Bacillus cereus* 5% (v/v)

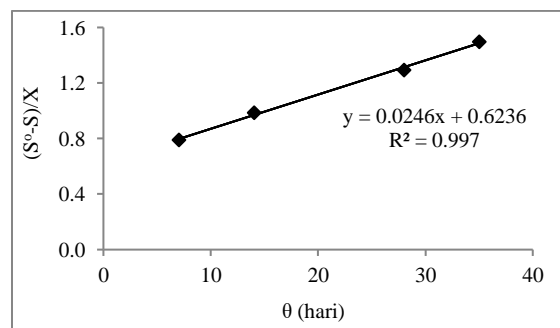


Gambar 13. Hubungan $\theta X / (S^0 - S)$ vs $1/S$ pada penambahan bakteri *Bacillus cereus* 5% (v/v)

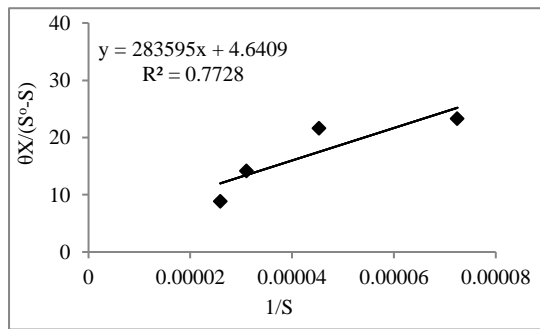
Di dalam studi ini, konstanta kinetika (Y , k_d , k_o dan K_m) untuk operasi yang kontinyu telah diperoleh dari pengukuran yang bersifat eksperimen dari konsentrasi biomassa, menerapkan laju beban organik dan konsumsi substrate sepanjang kondisinya kontinyu. Laju konstanta yang diperoleh berdasar pada model kinetika Monod.

Pada Gambar 12, untuk biodegradasi lumpur minyak bumi, terlihat bahwa dengan berdasar pada data pertumbuhan mikroba pada campuran polutan adalah suatu aspek penting pada proses bioremediasi. Berdasarakan hasil yang ditunjukkan pada hubungan antara $(S^0 - S)/X$ vs θ , diperoleh parameter kinetika mikroba untuk, $Y = 1,745$ mg biomass/mg substrate dari data biomassa yang diproduksi di dalam periode kontinyu terhadap substrat yang dikonsumsi didalam periode yang sama dan $k_d = 0,028$ hari⁻¹ pada slope 0,016 dengan intersep 0,573 dan pada Gambar 13, diperoleh parameter kinetika mikroba untuk, $k_o = -0,132$ hari⁻¹ dan $K_m = 1745201$ mg/L pada slope 1000000 dengan intersep -0.132.

Pada Gambar 14, terlihat bahwa dengan berdasar pada data regresi pada pertumbuhan mikroba didapat hasil untuk hubungan antara $(S^0 - S)/X$ vs θ , diperoleh parameter kinetika mikroba $Y = 1,605$ mg biomass/mg substrate dari data biomassa yang diproduksi di dalam periode kontinyu terhadap substrat yang dikonsumsi didalam periode yang sama dan $k_d = 0,038$ hari⁻¹ pada slope 0,024 dengan intersep 0,623.

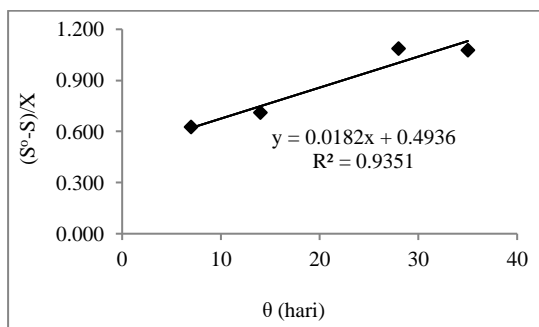


Gambar 14. Hubungan $(S^0 - S)/X$ vs θ pada penambahan bakteri *Bacillus cereus* 10% (v/v)

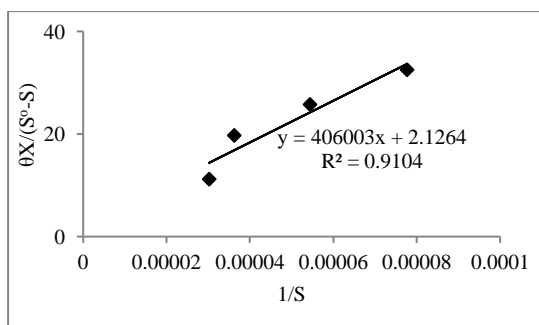


Gambar 15. Hubungan $\theta X / (S^0 - S)$ vs $1/S$ pada penambahan bakteri *Bacillus cereus* 10% (v/v)

Sedangkan pada Gambar 15 menunjukkan hubungan antara $\theta X / (S^0 - S)$ vs $1/S$ dan diperoleh parameter kinetika mikroba untuk, $k_o = 0,346 \text{ hari}^{-1}$ dan $K_m = 45520,1 \text{ mg/L}$ pada slope 28359 dengan intersep 4,640.



Gambar 16. Hubungan $(S^0 - S)/X$ vs θ pada penambahan bakteri *Bacillus cereus* 15% (v/v)



Gambar 17. Hubungan $\theta X / (S^0 - S)$ vs $1/S$ pada penambahan bakteri *Bacillus cereus* 15% (v/v)

V. KESIMPULAN

Metode slurry bioreaktor dapat digunakan untuk proses bioremediasi dalam mendegradasi hidrokarbon minyak bumi. Penurunan nilai TPH terjadi pada setiap reaktor, baik yang tanpa penambahan bakteri maupun dengan penambahan bakteri dan penurunan TPH yang paling baik terjadi pada reaktor dengan penambahan bakteri 10% (v/v) dengan TPH akhir sebesar 7000 $\mu\text{g/g}$, dengan persen biodegradasi sebesar 86 %.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonim, "KEPMEN Lingkungan Hidup," Nomor: 128 tahun 2003, Tata Cara Dan Persyaratn Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi Dan Tanah Terkontaminasi Oleh Minyak Bumi Secara Biologis, 2003.
- [2] R. M. Atlas, "Microbial degradation of petroleum hydrocarbon: an environmental perspective," *Microbial review*. 45(1), 180-209, 1981.
- [3] I. V. R. Gonzalez, F. Fava, and H. M. P. Varaldo, "A review on slurry bioreactor for bioremediation of soils and sediments," *Journal Microbial Cell*, 7(5), 2008.
- [4] S. K. Harayama, "Biodegradation of crude oil," Program and Abstracts in the First Asia-Pacific, Marine Biotechnology Conference, Shimizu, Shizuoka, Japan, 1995.
- [5] A. Nugroho, "Bioremediasi hidrokarbon minyak bumi," Indonesia: Graha Ilmu Universitas Trisakti, 2006.
- [6] A., Nugroho, "Makara teknologi," 10 (2), 2006.
- [7] R. C. Prince, R. R., Lessard, and J. R. Clark, "Bioremediation of marine oil spills," *Oil & Gas Sciences and Technology-Rev, IFP*, 58 (4), 463-468, 2003.
- [8] D. W. Soundstrom, and H. E. Klei, "Wastewater Treatment," Prentice-Hall, Inc, pp. 94-97, 1979.
- [9] B. Yudono, M. Said, Pol Hakstege and F. X. Suryadi, "Kinetics of indigenous isolated bacteria *Bacillus mycoides* used for ex-situ bioremediation of petroleum contaminated soil in PT Pertamina sungai lilin south sumatera," *Journal of Sustainable Development*, 2 (3), 2009.