

Aplikasi Surfaktan Alami dan Sintetis untuk Meningkatkan Penghilangan Total Petroleum Hidrokarbon dari Tanah Tercemar

Esti Dyah Arum Mawarni^{1*}, Bieby Voijant Tangahu¹, Ary Bachtiar Khrisna Putra²

¹Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

²Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

*Koresponden email: estidyaha@gmail.com

Diterima: 14 Desember 2023

Disetujui: 22 Desember 2023

Abstract

Environmental pollution by petroleum hydrocarbons (total petroleum hydrocarbons) is an environmental problem affecting human health and the environment. Innovative and sustainable treatment methods are needed to solve this problem. One remediation technique that can be used is soil washing. Soil washing is a remediation technique using surfactants as a contaminant washing solution. This research study investigated the washing of soil contaminated by used motor oil using green and synthetic surfactants. The type of natural surfactant used was saponin at a concentration of 10,000 mg/L and synthetic surfactant Linear Alkylbenzene Sulfonate (LAS) at 800 mg/L. The effect of washing time and stirring speed on TPH reduction efficiency was also tested through a series of laboratory tests. Based on the statistical results, the three factors, namely surfactant type, washing time, and stirring speed, significantly influenced TPH removal. Optimum removal efficiency with LAS surfactant was obtained under washing time between 70 - 90 minutes and stirring speed between 40 - 50 rpm. Meanwhile, saponin surfactant at washing time is 60 - 80 minutes, and stirring speed is 48 - 50 rpm.

Keywords: *hydrocarbon, linear alkylbenzene sulfonate, lubricant oil, saponin, soil washing*

Abstrak

Pencemaran lingkungan oleh hidrokarbon minyak bumi (*total petroleum hydrocarbon*) adalah suatu permasalahan lingkungan yang berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan itu sendiri. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan metode pengolahan yang inovatif dan berkelanjutan. Salah satu teknik remediasi yang dapat digunakan adalah *soil washing*. *Soil washing* adalah teknik pencucian tanah menggunakan surfaktan sebagai larutan pencuci kontaminan. Studi penelitian ini menyelidiki pencucian tanah terkontaminasi oli motor bekas menggunakan surfaktan alami dan surfaktan sintetis. Jenis surfaktan alami yang digunakan adalah saponin pada konsentrasi 10.000 mg/L dan surfaktan sintetis *Linear Alkylbenzene Sulfonate* (LAS) dengan konsentrasi 800 mg/L. Melalui serangkaian uji laboratorium juga dilakukan pengujian pengaruh waktu pencucian dan kecepatan putaran terhadap efisiensi penurunan TPH. Berdasarkan hasil statistik ketiga faktor tersebut, yaitu jenis surfaktan, waktu pencucian, dan kecepatan putaran menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap penyisihan TPH. Efisiensi removal optimum dengan surfaktan LAS diperoleh pada kondisi waktu pencucian antara 70 – 90 menit dan kecepatan putaran antara 40 – 50 rpm. Sedangkan surfaktan Saponin pada waktu pencucian antara 60 – 80 menit dan kecepatan putaran antara 48 – 50 rpm.

Kata Kunci: *hidrokarbon, linear alkylbenzene sulfonate, oli motor, saponin, soil washing*

1. Pendahuluan

Minyak bumi (*crude oil*) masih menjadi sumber energi utama yang digunakan dalam industri transportasi dan industri pengolahan minyak dan gas bumi. Berdasarkan data *British Petroleum 2021*, konsumsi minyak dalam negeri meningkat 5,22% dari tahun sebelumnya menjadi 1,47 juta barel per hari. Hal ini yang menjadi alasan utama peningkatan kegiatan eksplorasi, eksploitasi, dan pengolahan produk minyak bumi (*crude oil*). Aktivitas kegiatan tersebut berpotensi menyebabkan kerusakan lingkungan, diantaranya berasal dari kebocoran atau tumpahan minyak, operasi kapal tanker, kecelakaan tanker dapat menyebabkan pencemaran laut dan pesisir [1]. Sedangkan pencemaran tanah dari aktivitas tersebut dapat ditemukan di area pengeboran minyak bumi yang dapat berasal dari tumpahan atau bocoran pipa saat penyulingan, pengangkutan, penyimpanan, pengolahan, dan ceceran saat pembersihan tangki [2]. Oli motor sebagai produk minyak bumi juga meningkat seiring dengan perkembangan otomotif di Indonesia.

Peningkatan jumlah kendaraan berbanding lurus dengan banyaknya jumlah buangan limbah oli yang dihasilkan [3].

Salah satu kontaminan yang terdapat pada tanah tercemar produk minyak bumi adalah senyawa hidrokarbon. Ketika senyawa ini mencemari tanah dan diserap oleh partikel-partikel tanah, maka sulit terurai, tidak mudah larut dalam air, dan bersifat toksik apabila terakumulasi di dalam tanah [4-5]. Selain itu, dengan sifat ini minyak bumi berpotensi mengikat bahan-bahan organik dan membentuk mikropolutan dalam tanah. Akibatnya, ketersediaan bahan organik dalam tanah berkurang secara signifikan dan mengganggu metabolisme mikroorganisme.

Beberapa metode pemulihan tanah tercemar hidrokarbon baik in situ maupun ex situ telah dikembangkan dengan teknik biologis, fisik kimia, dan termal. Metode fisik-kimia dan termal lebih intensif pada matriks tanah, membutuhkan lebih banyak energi dan biaya daripada metode biologis. Namun efisiensi remediasi ini lebih baik. Metode pencucian seperti *soil flushing* dan *soil washing*, telah menunjukkan hasil yang baik dalam menghilangkan kontaminan hidrokarbon dari tanah dengan menggunakan surfaktan [6]. Tanah tercemar hidrokarbon mengandung polutan hidrofobik yang melekat pada permukaan partikel tanah dan tidak larut dalam air. Surfaktan adalah sekelompok bahan kimia yang memiliki gugus hidrofilik (polar) dan hidrofobik (non polar) sehingga dapat menurunkan tegangan permukaan dan membantu desorpsi hidrokarbon pada matriks tanah [7]. Molekul surfaktan meningkatkan kelarutan polutan hidrofobik yang sulit larut melalui emulsifikasi, akibatnya meningkatkan ketersediaannya bagi mikroorganisme pengurai minyak [8].

Enhanced soil washing umumnya telah dilakukan dengan surfaktan sintetis dan hasilnya menunjukkan kemampuan pencucian yang baik untuk senyawa hidrofobik (hidrokarbon) dari tanah yang terkontaminasi [9]. Beberapa surfaktan sintetis, seperti Triton X-100, Tween 80, LAS terbukti mampu meningkatkan konsentrasi senyawa nonpolar dalam fase air [9-10]. Namun, sisa surfaktan sintetis dalam tanah dan air tanah memiliki potensi risiko toksisitas atau bahaya bagi lingkungan dan manusia kesehatan. Jadi, strategi yang lebih baik untuk teknologi pencucian tanah adalah dengan menggunakan *green surfactant* [11]. Berbagai penelitian pemanfaatan *green surfactants* dalam meremediasi tanah tercemar hidrokarbon banyak dilakukan.

Hasil *soil washing* tanah terkontaminasi hidrokarbon dengan *green surfactant* (biosurfaktan) menunjukkan penyisihan hidrokarbon antara 70-90% [9]. Sedangkan penyisihan hidrokarbon dengan surfaktan sintetis antara 55-80% [9]. Berdasarkan hasil penelitian-penelitian yang sudah dilakukan, maka perlu dilakukan perbandingan efektivitas penyisihan hidrokarbon menggunakan *green surfactant* dan surfaktan sintesis komersial. Selain jenis surfaktan, terdapat beberapa variabel proses yang mempengaruhi efisiensi proses pencucian tanah, yaitu konsentrasi surfaktan, lama pencucian (pengadukan), kecepatan putaran, rasio *solid/liquid*, dan tekstur tanah [12] juga dipelajari.

2. Metode Penelitian

Sampel Tanah

Sampel tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah *spiked soil* tercemar oli motor bekas. Komposisi fraksi distribusi tanah menyesuaikan dengan jenis tanah yang ada di pertambangan minyak bumi rakyat Wonocolo, yaitu *loam* [13]. Persentase distribusi partikel tanah pada tanah loam berdasarkan [14] yang akan digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 1**. Kontaminan oli motor bekas didapatkan dari kegiatan service motor. *Spiked soil* tercemar oli motor bekas dibuat dengan sengaja konsentrasi pencemar 20% (b/b).

Tabel 1. Rancangan *Spiked Soil*

Fraksi Ukuran Tanah	Komposisi Massa	Ukuran Partikel	Nomor Mesh
Pasir	50%	0,05 – 2 mm	10 mesh
Silt (lanau)	40%	0,002 – 0,05 mm	200 mesh
Clay (tanah liat)	10%	≤ 0,002 mm	5000 mesh

Surfaktan

Surfaktan yang digunakan dalam penelitian ini adalah saponin untuk jenis *green surfactant* dan *linear alkylbenzene sulfonate* (LAS) untuk jenis surfaktan sintetis. Kedua surfaktan tersebut adalah jenis bahan kimia teknis. *Critical micelle concentration* (CMC) dari saponin adalah 1000 mg/L [15] dan LAS adalah 4000 mg/L [10].

Percobaan Soil Washing

Percobaan *soil washing* dilakukan dalam *rotary agitator* RS-60 Biosan. Percobaan dilakukan dengan menimbang 7 g sampel tanah terkontaminasi dipindahkan ke dalam tube 50 ml lalu ditambahkan 21 ml larutan surfaktan (rasio *solid/liquid* 1:3). Konsentrasi surfaktan saponin adalah 10CMC, yaitu 10.000 mg/L. Menurut [15] konsentrasi ini dapat menyebabkan degradasi hidrokarbon mencapai 60%. Sedangkan konsentrasi surfaktan LAS adalah 0,2CMC, yaitu 800 mg/L. Menurut penelitian [10] dengan konsentrasi tersebut biodegradasi *crude oil* tertinggi mencapai $50,9 \pm 2,40\%$. Variasi percobaan *soil washing* disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Variasi Percobaan *Soil Washing*

Kode Percobaan	Waktu pencucian (menit)	Kecepatan putaran (rpm)	Rasio <i>Solid/liquid</i> (g/mL)
P1	30 menit	10 rpm	1:3
P2		25 rpm	
P3		50 rpm	
P4	60 menit	10 rpm	
P5		25 rpm	
P6		50 rpm	
P7	90 menit	10 rpm	
P8		25 rpm	
P9		50 rpm	

Setelah pencucian dilakukan, campuran tanah dan larutan surfaktan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan antara cairan dan padatan. Kemudian dilakukan analisis *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) pada tanah menggunakan metode gravimetri disesuaikan dengan US EPA-821-R-98-002 Metode 1664 tahun 1999 sebelum dan sesudah pencucian tanah. Menurut Ahn dkk., metode gravimetri cukup dapat diandalkan untuk penentuan minyak pelumas dalam tanah terkontaminasi [16]. Kandungan TPH yang dihilangkan dalam pencucian ditentukan oleh persamaan (1) – (2).

$$\% \text{ TPH} = \frac{\text{berat residu hidrokarbon (gram)}}{\text{berat sampel (gram)}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\% \text{ Removal TPH} = \frac{\% \text{ TPH sebelum} - \% \text{ TPH sesudah}}{\% \text{ TPH sebelum}} \times 100 \quad (2)$$

Analisis Data

Analisis data dilakukan secara statistik untuk mengetahui hubungan variasi percobaan dengan efisiensi removal TPH. Data kuantitatif yang telah diperoleh diuji menggunakan *analysis of variance* (ANOVA). Penggunaan ANOVA juga bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya interaksi antar faktor yang digunakan serta pengaruh perlakuan masing-masing unit eksperimen terhadap respon. Penggunaan ANOVA juga bertujuan untuk mengetahui ada tidaknya interaksi antar faktor yang digunakan serta pengaruh perlakuan masing-masing unit eksperimen terhadap respon. ANOVA diuji dengan tingkat signifikansi $P < 0,05$. Menurut [17] untuk mengatasi remediasi dengan *soil washing* yang efisien dan hemat biaya pada skala besar, maka kondisi operasi harus dioptimalkan. Hal tersebut dapat menggunakan teknik optimasi matematis yaitu *response surface methodology* (RSM). Model RSM dapat digunakan untuk memprediksi kondisi kinerja terbaik dengan menggunakan desain eksperimen yang tepat.

3. Hasil dan Pembahasan

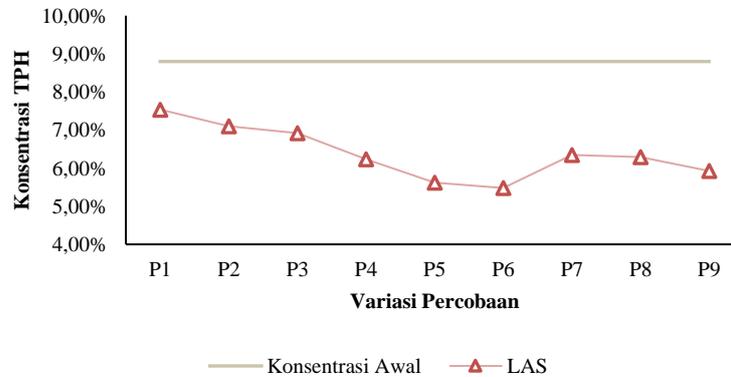
Konsentrasi TPH Awal

Konsentrasi rata-rata *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) awal pada *spiked soil* tercemar oli motor bekas pada penelitian ini adalah 8,80%. Nilai tersebut menunjukkan melebihi baku mutu TPH pada tanah tercemar 1% berdasarkan Kepmen LH No 128 Tahun 2003 [18]. Hal tersebut menunjukkan tanah tercemar harus dilakukan remediasi untuk menurunkan konsentrasi TPH dalam tanah.

Aplikasi LAS dalam Menurunkan TPH

Soil washing menggunakan surfaktan sintesis LAS menunjukkan penurunan kadar TPH dalam tanah tercemar. Berdasarkan hasil uji laboratorium **Gambar 1** menunjukkan pada percobaan P4, P5, dan P6

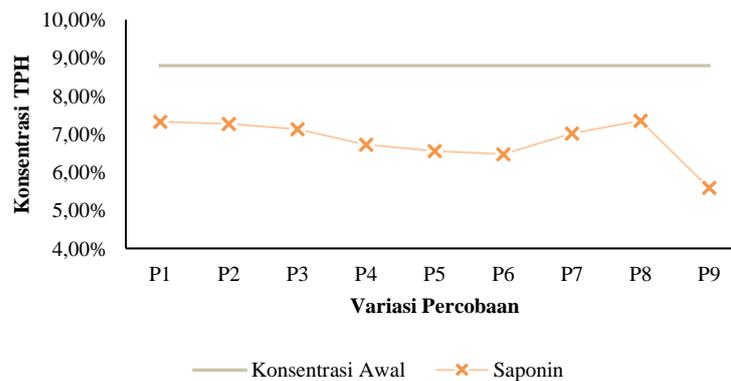
konsentrasi TPH pada tanah mengalami penurunan. Namun saat memasuki uji pada P7 mengalami peningkatan hingga P9. Percobaan P4, P5, dan P6 adalah proses *soil washing* selama 60 menit. Hal ini menunjukkan setelah waktu 60 menit, konsentrasi TPH kembali mengalami peningkatan. Maksimal selisih konsentrasi TPH awal dan setelah *soil washing* adalah 3,32% (P6) pada kondisi waktu pencucian 60 menit, kecepatan putaran 50 rpm, dan rasio *solid/liquid* 1:3. Sedangkan selisih penurunan TPH paling kecil adalah 1,26% (P1) pada kondisi waktu pencucian 30 menit, kecepatan putaran 10 rpm, dan rasio *solid/liquid* 1:3.



Gambar 1. Penurunan Konsentrasi TPH dengan Surfaktan Sintetis LAS

Aplikasi Saponin dalam Menurunkan TPH

Berdasarkan hasil uji laboratorium **Gambar 2** penurunan TPH menggunakan surfaktan saponin memiliki pola yang sama dengan surfaktan sintetis. Pada percobaan P4, P5, dan P6 mengalami penurunan konsentrasi, namun saat memasuki percobaan P6 dan P7 mengalami kenaikan konsentrasi kembali. Hal yang membedakan antara Saponin dan LAS adalah pada percobaan P9 dan P18. Pada saponin menunjukkan konsentrasi TPH menurun secara signifikan. Hal ini dikarenakan perlakuan yang diberikan adalah waktu pencucian 90 menit dan kecepatan putaran 50 rpm (maksimal dalam percobaan). Maksimal selisih nilai TPH awal dan setelah *soil washing* dengan saponin adalah 3,21% (P9) pada waktu pencucian 90 menit, kecepatan putaran 50 rpm dan rasio *solid/liquid* 1:3. Sedangkan penurunan TPH dengan saponin minimal adalah 1,44% (P8) pada waktu pencucian 90 menit, kecepatan putaran 25 rpm, dan rasio *solid/liquid* 1:3.



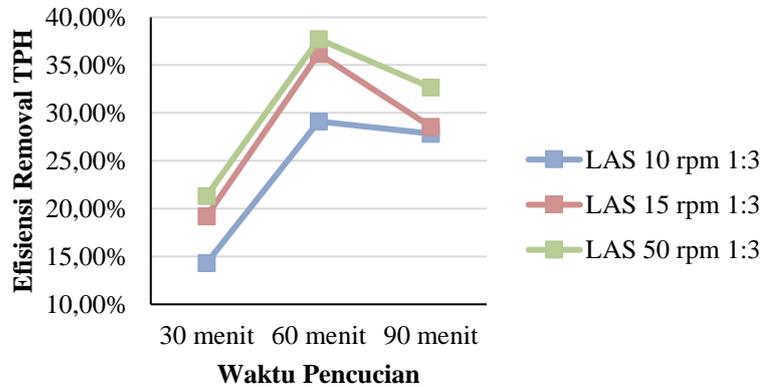
Gambar 2. Penurunan Konsentrasi TPH dengan Surfaktan Alami Saponin

Efisiensi penurunan TPH menggunakan *green surfactant* (Saponin) menunjukkan lebih kecil dari surfaktan sintetis LAS. Menurut penelitian [19] efisiensi penurunan TPH dengan saponin juga lebih kecil dibandingkan dengan surfaktan sintetis TX-100. Hal ini dikarenakan saponin berasal dari tanaman dan penambahan saponin secara simultan akan mendukung pertumbuhan mikroorganisme terkait di rizosfer dan menyediakan senyawa hidrokarbon yang dilepaskan secara perlahan kepada pendegradasi hidrokarbon, sehingga meningkatkan penyisihan TPH. Aktivitas mikroba pada saponin dalam hal aktivitas dehidrogenase tampaknya menjadi indikator untuk memprediksi efisiensi penurunan TPH dengan surfaktan saponin.

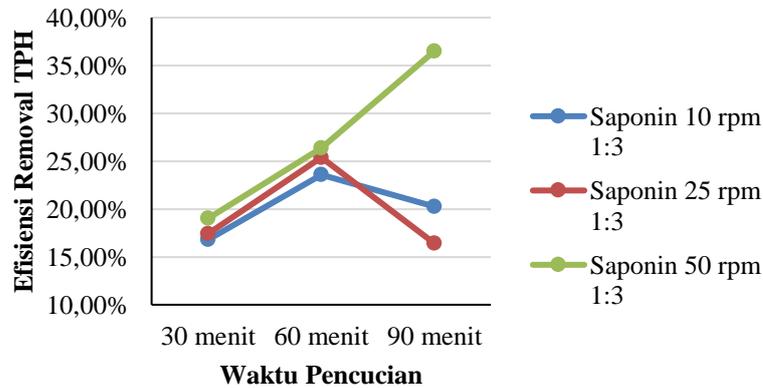
Pengaruh Waktu Pencucian Terhadap Penurunan Konsentrasi TPH

Pada **Gambar 3** merupakan hubungan antara waktu pencucian dengan jenis surfaktan LAS dan saponin. Terlihat pada grafik tersebut hubungan konsentrasi TPH dengan waktu pengadukan pada surfaktan

LAS dan saponin. Pada waktu pencucian 0 hingga 30 menit, menunjukkan konsentrasi TPH menurun dari konsentrasi awal dan terus menurun hingga waktu 60 menit. Namun pada waktu rentang waktu 60 menit hingga 90 menit, konsentrasi TPH meningkat kembali. Waktu pencucian dengan surfaktan LAS dan saponin menunjukkan efisiensi penurunan TPH relatif tinggi pada fase awal 30 dan 60 menit kemudian mendekati tingkat yang stabil dan meningkat. Hal ini disebabkan oleh pelarutan dengan laju terbatas, dan/atau desorpsi TPH. Pemecahan/ pemisahan kerak atau terperangkapnya tanah juga dapat menyebabkan proses yang bergantung pada waktu ini [20].



(a)

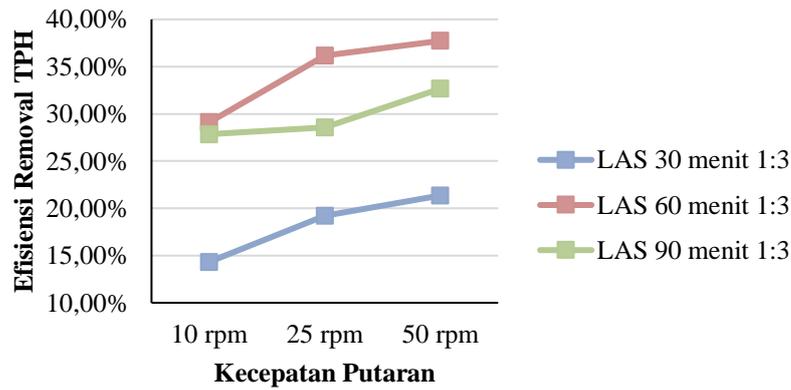


(b)

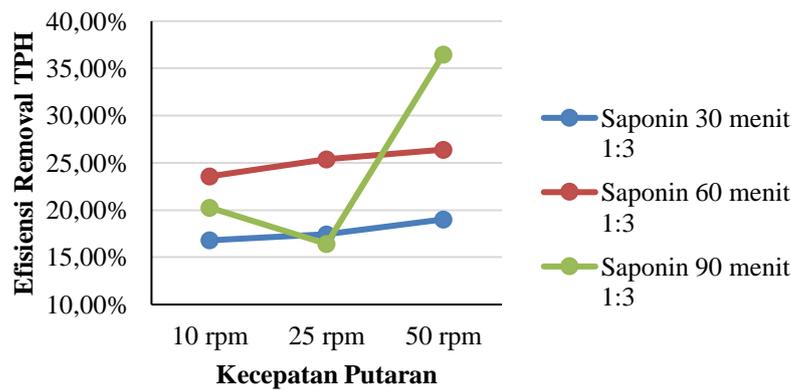
Gambar 3. Hubungan Waktu Pencucian dengan Efisiensi Removal TPH: (a) LAS (b) Saponin

Pengaruh Kecepatan Putaran Terhadap Penurunan Konsentrasi TPH

Pada Gambar 4 merupakan hubungan antara kecepatan putaran dengan jenis surfaktan LAS dan saponin. Pada kedua gambar tersebut menunjukkan konsentrasi TPH mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kecepatan putaran. Hal ini menunjukkan bahwa tumbukan antar partikel tanah semakin kuat seiring dengan meningkatnya kecepatan putaran sehingga membantu pengupasan kontaminan yang teradsorpsi atau berkerak [20].



(a)



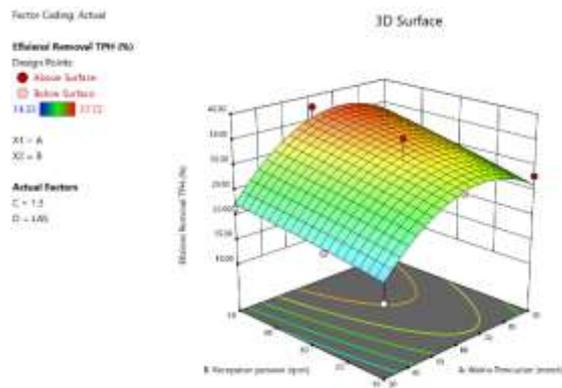
(b)

Gambar 4. Hubungan Kecepatan Putaran dengan Efisiensi Removal TPH: (a) LAS (b) Saponin

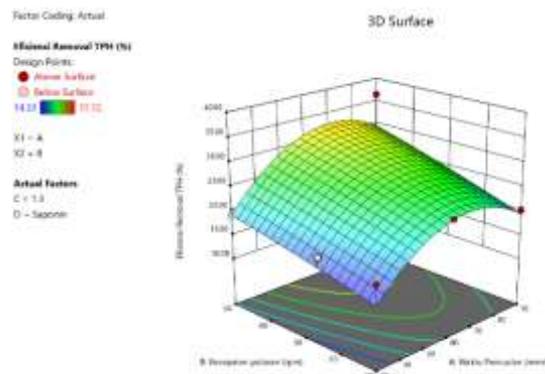
Uji Statistik

Menurut Olanmi (2020), *Analysis of variance* (ANOVA) digunakan untuk menentukan tingkat signifikansi statistik dan tingkat pengaruh parameter terhadap Pengurangan TPH. ANOVA diuji dengan tingkat signifikansi $P < 0,05$. Analisis dilakukan memasukkan parameter operasi *soil washing*, yaitu jenis surfaktan, waktu pencucian, dan kecepatan putaran. Adapun parameter respon yang dimasukkan adalah efisiensi removal TPH. Berdasarkan hasil uji ANOVA menunjukkan *p value* model dibawah 0,05 sehingga dapat disimpulkan respon signifikansi terhadap model. Nilai *p value* waktu pencucian, kecepatan putaran, dan jenis surfaktan $< 0,05$. Hal ini berarti memiliki pengaruh signifikan dari interaksi antara waktu pengadukan, kecepatan pengadukan, dan jenis surfaktan terhadap efisiensi penurunan TPH.

Data hasil percobaan diolah dengan software statistik dengan metode *Response Surface Methodology* (RSM) untuk mengetahui titik optimum operasi *soil washing* dalam menurunkan TPH. RSM merupakan metode optimasi yang bertujuan untuk memperkirakan kombinasi input yang untuk meminimalkan fungsi tujuan. Kondisi optimum diterapkan untuk memperoleh respon terbaik dari kondisi operasi. Terdapat respon yang digunakan dalam proses optimasi, yaitu respon efisiensi penurunan TPH. Berdasarkan **Gambar 5a** menunjukkan efisiensi TPH pada kondisi jenis surfaktan LAS dengan rasio *solid/liquid* 1:3 semakin baik apabila pada waktu pencucian antara 70 – 90 menit dan kecepatan putaran antara 40 – 50 rpm. Berdasarkan **Gambar 5b** menunjukkan efisiensi TPH pada kondisi jenis surfaktan Saponin dengan rasio *solid/liquid* 1:3 semakin baik apabila pada waktu pencucian antara 60 – 80 menit dan kecepatan putaran antara 48 – 50 rpm.



(a)



(b)

Gambar 5. Hubungan Waktu Pencucian dan Kecepatan Putaran Terhadap Efisiensi Removal TPH:
(a) LAS (b) Saponin

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan membandingkan aplikasi surfaktan alami dan sintesis menunjukkan hasil penggunaan surfaktan sintesis *Linear Alkylbenzene Sulfonate* (LAS) memiliki efisiensi penurunan *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH) lebih tinggi dibandingkan *green surfactant* Saponin. Efisiensi penurunan TPH pada kedua jenis surfaktan juga dipengaruhi kondisi operasional *soil washing*. Hal ini dikarenakan efisiensi maksimum dari keduanya diperoleh dari kondisi operasional yang berbeda. Variasi waktu pencucian dan kecepatan putaran memberikan pengaruh terhadap efisiensi penurunan TPH (p value < 0,05). Titik optimum operasi *soil washing* adalah jenis surfaktan LAS, waktu pencucian 71,6 menit, kecepatan putaran 50 rpm.

5. Referensi

- [1] Sulistyono, S. (2013). Dampak Tumpahan Minyak (Oil Spill) di Perairan Laut pada Kegiatan Industri Migas dan Metode Penanggulangannya. *Swara Patra: Majalah Ilmiah PPSDM Migas*, 3(1).
- [2] Sanchez-Salas, J. L., Gutierrez, M. R., & Bandala, E. R. (2017). Aerobic treatment of petroleum industry effluents. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 79-102). Elsevier.
- [3] Hasyim, U. H. (2016). Kajian Adsorpsi Logam Dalam Pelumas Bekas Dan Prospek Pemanfaatannya Sebagai Bahan Bakar. *Jurnal Konversi*, 5(1), 11-16.
- [4] Setiadi, Y., Salim, F., & Silmi, Y. (2014). Seleksi adaptasi jenis tanaman pada tanah tercemar minyak bumi. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 5(3), 160-166.
- [5] Jain, P. K., Gupta, V. K., Gaur, R. K., Lowry, M., Jaroli, D. P., & Chauhan, U. K. (2011). Bioremediation of petroleum oil contaminated soil and water. *Research journal of environmental toxicology*, 5(1), 1.

- [6] Karthick, A., Roy, B., & Chattopadhyay, P. (2019). A review on the application of chemical surfactant and surfactant foam for remediation of petroleum oil contaminated soil. *Journal of environmental management*, 243, 187-205.
- [7] Almansoori, A. F., Hasan, H. A., Idris, M., Abdullah, S. R. S., & Anuar, N. (2015). Potential application of a biosurfactant in phytoremediation technology for treatment of gasoline-contaminated soil. *Ecological Engineering*, 84, 113-120
- [8] Das, N., & Chandran, P. (2011). Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology research international*, 2011.
- [9] Chaprao M J, Ferreira I N S, Correa P F, Rufino R D, Luna J M, Silva E J, Sarubbo L A. 2015. Application of bacterial and yeast biosurfactants for enhanced removal and biodegradation of motor oil from contaminated sand. *Electron J Biotechnol.* 18: 471-479
- [10] Tian, W., Yao, J., Liu, R., Zhu, M., Wang, F., Wu, X., & Liu, H. (2016). Effect of natural and synthetic surfactants on crude oil biodegradation by indigenous strains. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 129, 171-179.
- [11] Zhou, W., Wang, X., Chen, C., & Zhu, L. (2013). Enhanced soil washing of phenanthrene by a plant-derived natural biosurfactant, Sapindus saponin. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 425, 122-128.
- [12] Gautam, P., Bajagain, R., & Jeong, S. W. (2020). Combined effects of soil particle size with washing time and soil-to-water ratio on removal of total petroleum hydrocarbon from fuel contaminated soil. *Chemosphere*, 250, 126206.
- [13] Naja, Aqiel Abdullah. (2021). Desain Alat Soil Washing untuk Remediasi Tanah Tercemar Crude Oil di Pertambangan Minyak Bumi Rakyat Wonocolo, Bojonegoro. *Tugas Akhir Teknik Lingkungan ITS 2021*
- [14] CAERT. 2021. Soil Texture and Structure. Anonim: E unit
- [15] Kobayashi, T., Kaminaga, H., Navarro, R. R., & Iimura, Y. (2012). Application of aqueous saponin on the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons-contaminated soil. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 47(8), 1138-1145.
- [16] Ahn, S., Seo, J. M., & Lee, H. (2021). Thermogravimetric analysis of marine gas oil in lubricating oil. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 339.
- [17] Alman-Abad, Z. S., Pirkharrati, H., Asadzadeh, F., & Maleki-Kakelar, M. (2020). Application of response surface methodology for optimization of zinc elimination from a polluted soil using tartaric acid. *Adsorption Science & Technology*, 38(3-4), 79-93.
- [18] Kementerian Lingkungan Hidup. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Bumi secara Biologis.
- [19] Hoang, S. A., Lamb, D., Sarkar, B., Seshadri, B., Lam, S. S., Vinu, A., & Bolan, N. S. (2022). Plant-derived saponin enhances biodegradation of petroleum hydrocarbons in the rhizosphere of native wild plants. *Environmental Pollution*, 313, 120152.
- [20] Peng, S., Wu, W., & Chen, J. (2011). Removal of PAHs with surfactant-enhanced soil washing: influencing factors and removal effectiveness. *Chemosphere*, 82(8), 1173-1177.