

Efektifitas Inokulasi Bioagen dan Kompos Rami pada Fitoremediasi Limbah Minyak Bumi Menggunakan Tanaman Rami (*Boehmeria nivea* L.)

Pujawati Suryatmana^{1*}, Yuhanidz², Betty Natali Fitriatin¹, Mieke Rochimi Setiawati¹,
Reginawanti Hindersah¹, dan Rina Devnita¹

¹Departemen Ilmu Tanah dan Pengelolaan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran Jalan Raya Ir. Soekarno, Km 21, Jatinangor 45363

²Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran

*Alamat korespondensi: pujawati@unpad.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRACT/ABSTRAK
Diterima: 20-11-2025	
Direvisi: 17-07-2026	Effectiveness of bioagent inoculation and ramie compost application for phytoremediation of petroleum waste using ramie (<i>Boehmeria nivea</i> L.)
Dipublikasi: 12-10-2026	
Keywords: <i>Aspergillus niger</i> , <i>Azotobacter vinelandii</i> , Biodegradation efficiency, Petrophilic fungi, Shoot number	Petroleum contains toxic hydrocarbons and is characterized by high levels of total petroleum hydrocarbons (TPH). Hydrocarbon contamination can adversely affect soil quality and health. Phytoremediation is an alternative approach for reducing toxic hydrocarbon concentrations in contaminated soils. This study used ramie (<i>Boehmeria nivea</i> L.), microbial inoculants (<i>Azotobacter vinelandii</i> , <i>Aspergillus niger</i> , and their consortium), and ramie compost. The study aimed to evaluate the effects of bioagents and ramie compost on hydrocarbon biodegradation efficiency, fungal population, and the number of shoots and plant height of ramie. The experiment was conducted under greenhouse conditions at the Faculty of Agriculture, Universitas Padjadjaran, Jatinangor, at an elevation of 822 m above sea level, from February to August 2024. Soil analyses were conducted at the Soil Fertility and Plant Nutrition Laboratory, Faculty of Agriculture, Universitas Padjadjaran. The experiment employed a factorial randomized complete block design (RCBD) with two factors. The first factor was the addition of microbial inoculants at a concentration of 2%, consisting of three levels: <i>A. vinelandii</i> , <i>A. niger</i> , and their consortium. The second factor was the application of ramie compost at three dosage levels: 0, 125, and 250 g. The results showed that there was no significant interaction or main effect of <i>A. vinelandii</i> , <i>A. niger</i> , their consortium, or ramie compost on hydrocarbon biodegradation efficiency or plant height. However, all bioagent treatments significantly increased the population of petrophilic fungi compared with the control. Each bioagent treatment and both doses of ramie compost also significantly increased the number of ramie shoots compared with the control. The success of phytoremediation in removing petroleum hydrocarbon pollutants is influenced, among other factors, by the appropriate dosage of the bulking agent and the selection of highly effective bioagents. In this study, the application of <i>A. vinelandii</i> and <i>A. niger</i> did not significantly enhance the performance of the phytoremediation process.
Kata Kunci: <i>Aspergillus niger</i> , <i>Azotobacter vinelandii</i> , Efisiensi biodegradasi, Jamur petrofilik, Jumlah tunas	Minyak bumi mengandung hidrokarbon toksik dengan kandungan <i>total petroleum hydrocarbons</i> (TPH) yang tinggi. Pencemaran hidrokarbon pada tanah dapat menurunkan kualitas dan kesehatan tanah. Fitoremediasi merupakan salah satu alternatif untuk mengurangi konsentrasi hidrokarbon toksik pada tanah tercemar. Penelitian ini menggunakan tanaman rami (<i>Boehmeria nivea</i> L.), inokulan mikroba (<i>Azotobacter vinelandii</i> , <i>Aspergillus</i>

niger, dan konsorsiumnya), serta kompos rami. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh bioagen dan kompos rami terhadap efisiensi biodegradasi hidrokarbon, populasi jamur, serta jumlah tunas dan tinggi tanaman rami. Percobaan dilaksanakan pada skala rumah kaca di Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran, Jatinangor, pada ketinggian 822 mdpl, dari Februari hingga Agustus 2024. Analisis tanah dilakukan di Laboratorium Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran. Percobaan menggunakan rancangan acak kelompok (RAK) faktorial dengan dua faktor. Faktor pertama adalah penambahan inokulan dengan konsentrasi 2% yang terdiri atas tiga taraf, yaitu *A. vinelandii*, *A. niger*, dan konsorsiumnya. Faktor kedua adalah aplikasi kompos rami yang terdiri atas tiga taraf dosis, yaitu 0, 125, dan 250 g. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi maupun pengaruh utama yang signifikan dari aplikasi *A. vinelandii*, *A. niger*, konsorsiumnya, maupun kompos rami terhadap efisiensi biodegradasi hidrokarbon dan tinggi tanaman. Namun, seluruh perlakuan bioagen secara signifikan meningkatkan populasi jamur petrofilik dibandingkan dengan kontrol. Masing-masing perlakuan bioagen dan kedua dosis kompos rami juga secara signifikan meningkatkan jumlah tunas tanaman rami dibandingkan dengan kontrol. Keberhasilan fitoremediasi dalam menghilangkan polutan hidrokarbon minyak bumi dipengaruhi antara lain oleh ketepatan dosis *bulking agent* yang digunakan dan pemilihan bioagen terseleksi dengan kinerja tinggi. Dalam penelitian ini, aplikasi *A. vinelandii* dan *A. niger* belum menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja proses fitoremediasi.

PENDAHULUAN

Akumulasi limbah minyak bumi di lingkungan tanah maupun perairan mengandung hidrokarbon yang bersifat toksik, dan reaksi hidrokarbon di tanah dipengaruhi faktor lingkungan dan atmosfer, yang mendorong berbagai proses fisika, fisikokimia, kimia, dan biologi. Namun secara alami memerlukan waktu untuk terdegradasi (Truskewycz *et al.*, 2019). Minyak bumi terdiri dari campuran kompleks hidrokarbon, termasuk fraksi alifatik, siklo-alifatik, dan aromatik, serta komponen non-hidrokarbon seperti resin dan asfalten, yang sebagian besar menunjukkan kelarutan yang sangat rendah dalam air. Ketika minyak mentah meresap ke dalam tanah, komponen-komponennya berinteraksi dengan partikel tanah, mengubah karakteristik kimia dan fisika tanah, dan akibatnya memengaruhi lingkungan biologisnya (Sui *et al.*, 2021).

Menurut Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 128 Tahun 2003, kadar minyak bumi yang masih bisa diterima oleh tanah adalah kurang dari sama dengan 1%. Guna mencegah dan mengurangi tercemarnya minyak bumi pada tanah, bisa dilakukan dengan kegiatan remediasi. Remediasi adalah suatu teknologi pemulihan lahan tercemar. Terdapat tiga jenis remediasi tanah yaitu remediasi kimia, fisika dan

biologi. Pada penelitian ini menggunakan metode fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan proses penghilangan polutan yang memanfaatkan tanaman (Salim & Suryati, 2014; Mocek-Plóćiniak *et al.*, 2023).

Berdasarkan jenis polutannya mekanisme fitoremediasi untuk polutan organik dalam percobaan ini yaitu rhizodegradasi. Rhizodegradasi merupakan mekanisme pemecahan atau penghilangan kontaminan pada daerah zona perakaran atau rhizosfer oleh mikroorganisme (bakteri, jamur) yang hidup di sekitar rhizosfer. Bakteri indigen tanah akan berkolonisasi di zona rizosfer akibat adanya sekresi eksudat akar sebagai sumber nutrisi bagi mikroba (Yang *et al.*, 2023). Eksudat akar tanaman dapat dimanfaatkan sumber nutrisi sehingga mampu merangsang aktivitas katabolik mikroba indigen tanah (Reinhold-Hurek *et al.*, 2015). Senyawa organik yang dihasilkan eksudat akar di antaranya fenolik, asam organik, alkohol dan protein yang dapat menjadi sumber karbon mikroba yang dapat membantu proses degradasi hidrokarbon (Purwanti, 2008). Tanaman rami merupakan salah satu tanaman yang berpotensi sebagai agen fitoremediator tanah tercemar minyak bumi, karena memiliki sifat yang adaptif terhadap kelangsungan hidupnya meskipun tanpa diberikan perlakuan khusus. Tanaman penghasil serat ini merupakan tanaman nonpangan

yang memiliki nilai ekonomis cukup tinggi. Selain itu tanaman rami juga digunakan sebagai kompos untuk meningkatkan kesuburan tanah dengan meningkatkan N, P, K dan *soil organic matter* (SOM) atau bahan organik tanah dan digunakan sebagai pakan ternak yang mampu meningkatkan daya degradasi pakan sebesar 1,0–1,8% (Purwati, 2010).

Kendala dari fitoremediasi adalah waktu yang diperlukan cukup lama dalam proses degradasi polutan dengan konsentrasi tinggi. Demikian juga, karakteristik polutan yang bersifat toksik akan memengaruhi daya adaptasi tanaman, sehingga diperlukan penambahan bioagen yang dapat meningkatkan laju degradasi hidrokarbon sebagai polutan target. Beberapa spesies mikroba sebagai agen hayati mampu menghasilkan metabolit sekunder berupa biosurfaktan yang diekskresikan keluar dari dinding sel, dan mampu menguraikan hidrokarbon atau merubahnya menjadi komponen sederhana sehingga dapat masuk ke dalam sel melalui dinding sel (Reningtyas & Mahreni, 2015). Dua kelompok mikroba golongan bakteri dan Jamur yang berpotensi sebagai agen hayati yang dapat mendukung percepatan proses fitoremediasi limbah minyak bumi adalah *Azotobacter* spp. dan *Aspergillus* spp.

Suryatmana dan Setiawati (2014) melaporkan bahwa *Azotobacter* sp. dapat berkontribusi dalam pemasok nutrisi N, P dan biosurfaktan yang dapat menyebabkan terjadinya kondisi yang optimal untuk berlangsungnya proses degradasi hidrokarbon minyak bumi. Nitrogen dan P yang dihasilkan oleh *Azotobacter* dapat dimanfaatkan oleh tanaman untuk pertumbuhannya. *Azotobacter vinelandii* adalah bakteri gram negatif yang mengikat nitrogen menggunakan nitrogenase holoenzyme yang memiliki kofaktor kluster molybdenum besi sulfat (FeMoCo) sebagai lokasi aktif (Aly *et al.*, 2012). *Azotobacter vinelandii* merupakan bakteri aerob yang menerima energi dari reaksi redoks dengan menggunakan senyawa organik. *Azotobacter vinelandii* ini juga merupakan salah satu bakteri yang mampu mengakumulasi polyester tertinggi sekitar 70–90% massa kering sel (Navarro & Garcia-Cruz, 2010). Bakteri ini dikenal sebagai bakteri penambat N di atmosfer, sebagai *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR), meningkatkan ketersediaan substrat bagi petrobacter (Suryatmana *et al.*, 2007; Suryatmana *et al.*, 2024).

Aspergillus niger dilaporkan sebagai jamur petrofilik yaitu species jamur yang mampu mendegradasi hidrokarbon dalam tanah tercemar minyak bumi (Al-nasrawi, 2012). Jamur ini

memanfaatkan *crude oil* sebagai substrat untuk pertumbuhannya. Enzim ekstraseluler yang dihasilkan jamur akan memecah molekul hidrokarbon rekalsitrasi dengan merombak rantai hidrogen dan karbon sehingga bahan tersebut dapat digunakan untuk pertumbuhan jamur di dalam tanah tercemar minyak bumi (Adekunle & Adebambo, 2007). Jamur *A. niger* menghasilkan enzim lipase yang mampu menguraikan komponen minyak karena dapat mengoksidasi hidrokarbon yang digunakan sebagai donor elektronnya (Gautam *et al.*, 2011), mampu menurunkan *total petroleum hydrocarbons* (TPH) terbesar yaitu 78% (Sudrajat dkk., 2014; Sabah *et al.*, 2016), serta karakteristiknya yang berfilament dapat memproduksi biomassa yang besar dan pertumbuhan hifa yang ekstensif di dalam tanah sehingga dapat meningkatkan laju degradasi hidrokarbon yang menghasilkan senyawa *intermediate* yang akan didegradasi lanjut oleh bakteri (Steliga, 2012).

Jenis tanah yang dicemari minyak bumi di dalam penelitian ini adalah tanah Inceptisol, yang umumnya memiliki tekstur liat berdebu dan didominasi fraksi liat yang dapat menyebabkan akar tanaman sulit berkembang dan menghambat aliran air pada tanah. Adanya limbah minyak bumi memperburuk kondisi tanah, karena porositas tanah menjadi rendah sehingga tercipta aerasi yang buruk. Oleh karena itu perlu dilakukan penambahan *bulking agent*. Salah satu bahan yang bisa berperan sebagai *bulking agent* adalah kompos. Kompos merupakan komponen penting yaitu sebagai penggembur tanah yang berperan dalam proses oksidasi yang dilakukan oleh mikroba serta menjadi tambahan nutrisi yang cocok untuk pertumbuhan dan perkembangan mikroba (Juliani & Rahman, 2011). *Bulking agent* mampu meningkatkan porositas tanah untuk pertukaran oksigen yang dibutuhkan mikroba. Oksigen dibutuhkan mikroba sebagai akseptor elektron dalam proses oksidasi hidrokarbon, untuk menghasilkan energi dan reaksi enzimatis tertentu (Juliani & Rahman, 2011; Munawar & Elfita, 2015). Laju degradasi hidrokarbon dapat ditingkatkan melalui penambahan bahan organik yang mudah terdegradasi dengan kandungan karbon tinggi (Li *et al.*, 2023). Penambahan agen pengisi berperan penting dalam mengatur porositas, kadar air, dan ketersediaan nutrisi, sehingga mendorong pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi hidrokarbon, memperbaiki struktur tanah, aerasi, kapasitas menahan air, dan penetrasi akar, sehingga meningkatkan kondisi optimal tanah (Hamme *et al.*,

2013; Lin *et al.*, 2022). Tujuan penelitian difokuskan pada kajian efektifitas aplikasi inokulasi dua bioagen fitoremediasi yaitu *Azotobacter vinelandii* dan *Aspergillus niger* dengan penambahan *bulking agent* berupa kompos limbah tanaman rami untuk meningkatkan efisiensi biodegradasi petroleum hidrokarbon minyak bumi, viabilitas fungi petrofilik selama proses biodegradasi berlangsung, dan pertumbuhan tanaman rami.

BAHAN DAN METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

Percobaan dilaksanakan dalam skala rumah kaca, berlokasi di Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran Jatinangor, Kabupaten Sumedang, Provinsi Jawa Barat dengan ketinggian 822 mdpl. Penelitian dilaksanakan dari bulan Februari hingga bulan Agustus 2024. Analisis tanah dilakukan di Laboratorium Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Tanah Inceptisol untuk perlakuan diperoleh dari Lahan Percobaan Ciparanje, Jatinangor, sementara limbah minyak bumi diperoleh dari Pertamina Balongan Indramayu. Isolat bakteri *A. vinelandii* dan inokulan jamur *A. niger* merupakan koleksi Laboratorium Biologi Tanah Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Klon tanaman rami var. Lembang yang berasal dari Wonosobo, Jawa Tengah yang kemudian diperbanyak menggunakan rimpang tanaman rami. Tanaman rami untuk pembuatan kompos diperoleh dari Kabupaten Garut.

Rancangan Perlakuan

Rancangan percobaan yang digunakan adalah Rancangan Acak Kelompok (RAK) faktorial. Faktor pertama adalah aplikasi dua spesies isolat sebagai agen bioremediasi dan faktor kedua adalah aplikasi variasi dosis kompos tanaman rami sebagai *bulking agent*. Susunan perlakuan yang diujikan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

Faktor 1: Jenis inokulan (A), yang terdiri dari 4 taraf

- a₀ : kontrol (tanpa pemberian inokulan)
- a₁ : *Azotobacter vinelandii* 2% per beban limbah
- a₂ : *Aspergillus niger* 2% per beban limbah
- a₃ : Konsorsium inokulan (*A. vinelandii* + *A. niger*) dengan dosis 2% per beban limbah

Faktor 2: Variasi dosis kompos rami, yang terdiri dari 3 taraf

- b₀ : kontrol (tanpa pemberian kompos rami)
- b₁ : kompos rami sebanyak 125 g/polibeg
- b₂ : kompos rami sebanyak 250 g/polibeg

Rancangan Respon

Pengamatan yang dilakukan meliputi: efisiensi degradasi hidrokarbon, diukur dengan menggunakan data TPH hasil analisis, populasi total jamur dengan menggunakan metode TPC, pertumbuhan tanaman rami (tinggi tanaman), jumlah tunas, analisis awal kandungan unsur tanah dan kelembaban tanah.

Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Analisis Tanah Awal

Pengujian tanah awal menggunakan sampel yang berasal dari Kebun Ciparanje Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran dengan ordo Inceptisols. Pengambilan sampel tanah dilakukan secara komposit. Sampel tanah terlebih dahulu dibersihkan dari sisa-sisa tanaman untuk selanjutnya dikeringanginkan, kemudian disaring menggunakan saringan 2 mm. Analisis tanah awal merupakan analisis kimia (antara lain pH, N-total, dan P tersedia), analisis biologi (populasi mikroba) serta analisis fisika (tekstur tanah).

Persiapan Media Tanah Terkontaminasi

Tanah yang dibutuhkan untuk setiap polibeg yaitu 5 kg. Tanah setiap polibeg dikontaminasi dengan *crude oil* pada konsentrasi 7,5% (wt/v). Tanah yang sudah diberi minyak mentah diaduk hingga merata dan diinkubasikan selama satu malam.

Pembuatan Kompos Tanaman Rami

Pertama tanaman rami dicacah hingga menjadi bagian-bagian kecil agar mudah terdekomposisi. Kemudian dilakukan pemberian dedak dengan EM4 agar proses dekomposisi berlangsung cepat. Bahan yang sudah disatukan tersebut dicampurkan hingga merata, dan ditutup dengan terpal hingga tidak ada yang terbuka. Kompos rami akan menjadi kering dan tidak berbau setelah diinkubasi selama kurang lebih tiga bulan.

Aplikasi Pupuk Anorganik dan Inokulasi Isolat Bioagen

Pupuk anorganik yang digunakan sebagai pupuk dasar adalah pupuk N, P, K Tunggal dengan dosis 0,5 g urea, 0,125 g TSP dan 0,25 g KCl. Aplikasi pupuk anorganik dilakukan tiga tahap yaitu pertama kali dilakukan pada awal penanaman, dan selanjutnya diberikan sesuai dengan kondisi pertanaman rami di lahan. Pemupukan dilakukan dengan cara membenamkan pupuk di sekitar perakaran tanaman rami.

Aplikasi inokulan *A. vinelandii* dan *A. niger* dengan cara menginokulasikan kultur isolat ke dalam kompos rami sesuai perlakuan sebanyak 2% atau sama dengan 7,5 ml. Selanjutnya kompos rami yang mengandung kultur bioagen dicampurkan ke dalam media tanam secara merata. Setelah itu, tanaman rami ditanam pada media tanam yang telah disiapkan.

$$\text{Efisiensi biodegradasi (\%)} = \frac{[\text{TPH}]_{\text{awal}} - [\text{TPH}]_{\text{akhir}}}{[\text{TPH}]_{\text{awal}}} \times 100\%$$

Pengamatan terhadap pertumbuhan rami meliputi pengamatan tinggi tanaman rami dan jumlah tunas yang dilakukan secara manual.

Analisis Statistik

Data hasil percobaan dianalisis menggunakan perangkat lunak Statistical Product and Service Solutions (SPSS) versi 15.0. Analisis ragam (ANOVA) dilakukan dengan perbedaan yang signifikan diuji pada taraf signifikansi 5% ($p < 0,05$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Tanah Percobaan

Tanah yang digunakan pada penelitian ini adalah tanah ordo Inceptisol. Tanah diambil secara komposit dari lapisan atas tanah (*top soil*) dengan kedalaman 0-20 cm. Hasil analisis tanah awal sifat tanah disajikan pada Tabel 1.

Tanah percobaan memiliki pH agak masam yaitu 6,37. Nilai pH yang agak masam mendukung pertumbuhan jamur dibandingkan bakteri karena jamur memiliki kemampuan cepat tumbuh dan toleran terhadap pH yaitu pada kisaran 1,4–9,8 (Gautam *et al.*, 2011), KTK tinggi (26,96 cmol/kg), C-organik sedang (1,28%), kandungan kation-kation dapat ditukar seperti Al^{3+} dd, H^{+} dd rendah, sementara kejenuhan basa rendah (33,27%), memiliki tekstur liat berdebu dengan kandungan fraksi pasir 8,89%, debu 51,70% dan liat 39,41%. Berdasarkan penelitian Kogbara *et al.* (2015), aerasi pada tanah liat kurang mendukung aktivitas biodegradasi. Berdasarkan hal tersebut dalam penelitian ini dilakukan penambahan kompos rami sebagai *bulking agent* untuk meningkatkan porositas dan aerasi pada tanah.

Hasil analisis sifat biologi tanah Inceptisol Jatiningor menunjukkan bahwa tanah Inceptisol Jatiningor memiliki populasi total jamur sebesar $12,8 \times 10^4$ cfu/g dan *Azotobacter* sp. 4×10^4 cfu/g. Keberadaan mikroorganisme dalam tanah Inceptisol diharapkan mampu mendukung proses fitoremediasi

Pengamatan dan Pengukuran Pertumbuhan Tanaman Rami

Pengamatan penurunan *total petroleum hydrocarbons* (TPH) dilakukan pada awal fase 11 minggu setelah tanam, selanjutnya dihitung efisiensi biodegradasi TPH dengan menggunakan rumus:

dengan menghasilkan biosurfaktan yang mampu menurunkan tegangan air muka sehingga minyak mudah dimanfaatkan mikroba sebagai sumber nutrisinya.

Tabel 1. Karakteristik tanah awal Inceptisol asal Jatiningor

Parameter	Satuan	Nilai	Kriteria ¹⁾
pH H ₂ O		6,37	Agak masam
pH KCl		5,26	
C-Organik	%	1,28	Sangat rendah
N-Total	%	0,26	Rendah
C/N Rasio		4,9	Rendah
P ₂ O ₅ HCl 25%	mg 100	91,38	Tinggi
P ₂ O ₅ Bray I	ppm P	9,9	Sedang
KTK	cmol/kg	26,96	Tinggi
Kejenuhan basa	%	33,27	Rendah
Susunan kation:			
K	cmol/kg	0,30	Rendah
Na	cmol/kg	0,62	Sedang
Ca	cmol/kg	7,27	Sedang
Mg	cmol/kg	0,78	Rendah
Al^{3+} dd	cmol/kg	0,1353	
H^{+}	cmol/kg	0,1004	
Tekstur:			
Pasir	%	8,89	
Debu	%	51,70	Liat berdebu
Liat	%	39,41	

Keterangan: ¹⁾Kriteria berdasarkan Hardjowigeno (2007).

Kelembaban Tanah

Kelembaban tanah pada proses fitoremediasi hidrokarbon mengalami peningkatan yang cukup drastis. Pada minggu ke-0, kelembaban hanya berkisar antara 50–60%. Kemudian mengalami peningkatan, dan pada minggu ke-11 kelembaban tanah proses fitoremediasi hidrokarbon berkisar antara 75–91,67%. Hal ini sesuai dengan pernyataan bahwa biodegradasi hidrokarbon minyak bumi akan berjalan optimal pada kelembaban 30–90% (Jadhav *et*

al., 2019). Peningkatan kelembaban tanah disebabkan oleh penyiraman yang dilakukan sekali dalam satu hari. Kelembaban tanah yang cukup tinggi melindungi tanaman dari cekaman kekeringan. Kelembaban tanah selama percobaan sudah memenuhi kondisi yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman.

Efisiensi Degradasi Hidrokarbon

Hasil analisis ragam efisiensi degradasi hidrokarbon yang terjadi sampai minggu ke-11 menunjukkan bahwa tidak terdapat interaksi dan pengaruh mandiri antara penambahan inokulan dengan penambahan kompos rami terhadap peningkatan efisiensi degradasi hidrokarbon. Efek mandiri perlakuan terhadap efisiensi biodegradasi hidrokarbon disajikan pada Table 2.

Tabel 2. Pengaruh penambahan inokulan dan kompos rami terhadap efisiensi degradasi hidrokarbon pada proses fitoremediasi hidrokarbon minyak bumi selama inkubasi 11 minggu

Perlakuan	Efisiensi degradasi hidrokarbon (%)
Penambahan inokulan (A)	
a0 = Tanpa inokulan	85,50 a
a1 = <i>A. vinelandii</i> 2%	83,42 a
a2 = <i>A. niger</i> 2%	82,91 a
a3 = Konsorsium 2%	81,89 a
Penambahan kompos rami (B)	
b0 = Tanpa kompos rami	83,59 a
b1 = Kompos rami 125 g	82,93 a
b2 = Kompos rami 250 g	84,92 a

Keterangan: Nilai rata-rata perlakuan yang ditandai dengan huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Jarak Berganda Duncan pada taraf nyata 5%.

Data pada Tabel 2 menunjukkan bahwa perlakuan penambahan inokulan *A. vinelandii* (a1), *A. niger* (a2), dan konsorsiumnya (a3) tidak menunjukkan hasil yang berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan kontrol (a0). Hal ini terjadi karena mikroba *augment* (mikroba yang diaplikasikan) memerlukan waktu yang cukup lama terhadap kondisi cekaman toksik minyak bumi, sedangkan pada perlakuan kontrol mengandung mikroba indigenous petrofilik yang telah teradaptasi lebih baik terhadap cekaman toksik minyak bumi, sehingga kemampuan tumbuh dan memecah hidrokarbon cenderung lebih tinggi. Munawar dan Elfita (2015) melaporkan bahwa di dalam tanah dan limbah

minyak terdapat mikroba indigenous lebih mampu mendegradasi hidrokarbon minyak bumi menjadi senyawa yang lebih sederhana. Selain itu karena terjadi penurunan pH pada T-11 yang mencapai 5,8 yang cenderung kondisi menjadi asam. Penurunan pH terjadi karena aktifitas metabolisme yang menghasilkan asam-asam organik. Asam organik yang dihasilkan dapat menyebabkan kondisi tanah menjadi asam dan pH menjadi turun. Sementara itu, pH optimum proses biodegradasi adalah 7–8. Penurunan pH tanah menghambat terjadinya biodegradasi oleh mikroba pada T-11. Hal ini sejalan dengan penelitian Handrianto (2018). Selain pH, faktor yang menjadi penghambat biodegradasi hidrokarbon minyak bumi adalah jenis dan konsentrasi polutan di dalam tanah. Pada T-11, hidrokarbon yang tersisa pada tanah bersifat lebih kompleks termasuk senyawa rekalsitran yang sukar terdegradasi.

Faktor lingkungan lain yang berpengaruh pada efisiensi degradasi hidrokarbon adalah kelembaban tanah awal yaitu berada di bawah 70%, sedangkan kelembaban optimal pertumbuhan tanaman rami yaitu 83–89%. Kelembaban tanah yang tidak sesuai menyebabkan proses fotosintesis tanaman rami menjadi lambat. Fotosintesis pada tanaman rami memengaruhi jumlah fotosintat pada tanaman berupa gula atau glukosa yang terkandung pada eksudat akar (Suherman dkk., 2017). Dengan demikian, eksudat akar kurang mendukung aktivitas mikroba untuk mendegradasi hidrokarbon pada tanah tercemar limbah minyak bumi.

Kandungan C-organik di dalam tanah juga berpengaruh terhadap proses fitoremediasi hidrokarbon minyak bumi. Ketersediaan C-organik tanah yang sangat rendah (1,28%) saat awal fitoremediasi berlangsung, dapat membatasi mikroba dalam mendegradasi rantai hidrokarbon minyak bumi. Hal ini terjadi karena ketersediaan substrat pertama yang dapat digunakan mikroba untuk tumbuh dan berkembang menjadi terbatas, sehingga dalam mendegradasi hidrokarbon minyak bumi pun menjadi terbatas (Cookson, 1994).

Faktor mandiri konsentrasi kompos tidak berpengaruh nyata terhadap nilai efisiensi degradasi hidrokarbon. Tujuan diberikan kompos adalah sebagai *bulking agent* untuk meningkatkan porositas tanah sehingga terjadi aerasi tanah yang baik. Aerasi tanah yang baik mendukung aktivitas mikroba dalam melakukan degradasi hidrokarbon. Dalam penelitian ini faktor mandiri konsentrasi kompos rami dalam meningkatkan efisiensi degradasi hidrokarbon tidak

berpengaruh nyata. Hal ini disebabkan karena dosis yang diberikan belum cukup berperan sebagai ameliorant atau pembenah tanah, sehingga tujuan pemberian konsentrasi kompos rami tidak tercapai. Dengan demikian untuk mencapai kinerja biodegradasi yang maksimal diperlukan penambahan dosis kompos. Dosis yang terlalu rendah menyebabkan efek kompos tidak optimal dalam meningkatkan nutrisi bagi mikroba untuk melakukan proses metabolisme dalam mendegradasi hidrokarbon pada tanah tercemar limbah minyak bumi (Aliyanta dkk., 2011). Disamping itu karakteristik Inceptisol dalam penelitian ini merupakan tanah yang didominasi fraksi liat. Kogbara *et al.* (2015) melaporkan bahwa pada tanah liat memiliki aerasi kurang mendukung aktivitas biodegradasi, karena tipe liat kurang mendukung aktifitas mikroba yang digunakan. Meskipun dalam penelitian ini ditambahkan kompos sebagai *bulking agent*, namun dosis yang digunakan belum dapat meningkatkan daya dukung aktifitas bioagen.

Populasi Total Jamur

Hasil analisis ragam terhadap populasi total jamur pada minggu ke-11 menunjukkkan bahwa tidak terdapat interaksi antara penambahan inokulan dengan penambahan kompos rami terhadap keberadaan total populasi jamur. Tetapi terdapat pengaruh mandiri akibat penambahan inokulan terhadap keberadaan populasi total jamur (Table 3).

Perlakuan penambahan inokulan memberikan nilai yang berbeda nyata dengan kontrol (a0). Perlakuan penambahan *A. vinelandii* (a1) memiliki nilai tidak berbeda nyata dengan perlakuan penambahan *A. niger* (a2), sedangkan perlakuan *A. niger* berbeda nyata dengan perlakuan kontrol dan perlakuan konsorsium (a3). Nilai tertinggi cenderung pada perlakuan konsorsium (a3). Hal ini terjadi karena jamur yang dikombinasikan dengan *A. vinelandii* mampu meningkatkan populasi jamur dan lebih mampu beradaptasi pada tanah tercemar minyak bumi. Pengaruh penambahan kompos pada populasi total jamur juga tidak memberikan pengaruh yang nyata pada setiap perlakuannya. Hal ini terjadi karena dosis kompos yang diberikan tidak mampu membantu menyediakan nutrisi bagi pertumbuhan jamur di dalam tanah tercemar limbah minyak bumi. Berdasarkan morfologinya, jenis-jenis jamur yang terdapat pada tanah tercemar hidrokarbon adalah *Aspergillus niger*, *Trichoderma*, dan *Penicillium*.

Tabel 3. Pengaruh penambahan inokulan dan kompos rami terhadap populasi total jamur pada proses fitoremediasi hidrokarbon minyak bumi selama inkubasi 11 minggu

Perlakuan	Populasi total jamur (x 10 ⁴ CFU/g)
Penambahan inokulan (A)	
a0 = Tanpa inokulan	2,05 a
a1 = <i>A. vinelandii</i> 2%	2,70 bc
a2 = <i>A. niger</i> 2%	3,01 c
a3 = Konsorsium 2%	2,86 b
Penambahan kompos rami (B)	
b0 = Tanpa kompos rami	2,62 a
b1 = Kompos rami 125 g	2,56 a
b2 = Kompos rami 250 g	2,64 a

Keterangan: Nilai rata-rata perlakuan yang ditandai dengan huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Jarak Berganda Duncan pada taraf nyata 5%.

Tinggi Tanaman Rami

Hasil analisis efek perlakuan terhadap tinggi tanaman rami disajikan pada Tabel 4 dan Gambar 1 dan Gambar 2. Tidak terdapat interaksi antara faktor perlakuan yang diuji, demikian pula efek mandiri faktor perlakuan tidak menghasilkan perbedaan yang signifikan. Kondisi lingkungan tumbuh tanaman rami yang toksik akibat adanya hidrokarbon minyak bumi menyebabkan pertumbuhan tinggi tanaman rami menjadi terhambat. Faktor penambahan inokulan dan kompos rami tidak menunjukkan adanya interaksi dan pengaruh mandiri antar kedua faktor terhadap tinggi tanaman rami pada tanah tercemar minyak bumi. Tinggi tanaman rami pada minggu ke-11 berkisar antara 26–29 cm.

Berdasarkan hasil analisis menunjukkan bahwa perlakuan penambahan inokulan *A. vinelandii* (a1), *A. niger* (a2), dan konsorsium (a3) tidak berbeda nyata dibandingkan dengan perlakuan kontrol (a0). Hal ini disebabkan oleh polutan hidrokarbon yang tersisa di dalam tanah pada minggu ke-11 merupakan hidrokarbon yang lebih resisten (sulit terdegradasi), sehingga penambahan inokulan tidak menunjukkan adanya perbedaan yang nyata dengan perlakuan kontrol. Namun nilai tertinggi cenderung pada perlakuan *A. niger* (a3) yaitu 29,16 cm. Hal ini disebabkan karena jamur mampu hidup pada pH yang rendah sehingga keberadaannya lebih dominan dan lebih berpengaruh dibandingkan mikroba lainnya. Hasil di atas pada minggu ke-11 menunjukkan tanah mengalami penurunan pH yaitu berkisar antara 5,5–6,8, sedangkan bakteri dominan

beraktivitas optimal pada pH 6–8. Selain itu, jamur mampu menghasilkan hormon IAA yang membantu pertumbuhan tanaman, serta jamur juga mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kondisi

toksik (Subowo, 2014). Salah satu peran IAA yang dihasilkan oleh jamur adalah untuk memediasi interaksi antara jamur dan tanaman (Abri dkk., 2015).



Gambar 1. Tinggi tanaman rami umur 11 minggu akibat perlakuan tanpa inokulan (a0), *A. vinelandii* 2% (a1), *A. niger* 2% (a2), konsorsium (a3)



Gambar 2. Tinggi tanaman rami umur 11 minggu akibat perlakuan kompos 250 g/polibeg (b2), kompos 125 g/polibeg (b1), tanpa kompos (b0).

Perlakuan penambahan kompos terhadap tinggi tanaman rami pada media tanah tercemar minyak bumi juga tidak menunjukkan perbedaan nyata dibandingkan dengan kontrol. Hal ini diduga karena dosis kompos yang diberikan belum cukup untuk memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah serta memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman dan mikroba petrofilik. Kompos berpotensi meningkatkan tinggi tanaman melalui penyediaan unsur hara, terutama N, P, dan K, perbaikan porositas dan kapasitas menahan air, serta peningkatan aktivitas mikroba rizosfer yang

membantu menurunkan toksisitas hidrokarbon. Namun, apabila dosis dan tingkat kematangan kompos belum optimal, perbaikan kondisi perakaran dan ketersediaan unsur hara belum cukup besar untuk menghasilkan peningkatan tinggi tanaman secara nyata. Hasil percobaan ini menunjukkan bahwa ketepatan dosis dan kualitas bahan organik merupakan salah satu faktor kunci keberhasilan fitoremediasi.

Tabel 4. Pengaruh penambahan inokulan dan kompos rami terhadap tinggi tanaman rami pada proses fitoremediasi hidrokarbon minyak bumi selama inkubasi 11 minggu

Perlakuan	Tinggi tanaman rami (cm)
Penambahan inokulan (A)	
a0 = Tanpa inokulan	27,83 a
a1 = <i>A. vinelandii</i> 2%	27,58 a
a2 = <i>A. niger</i> 2%	29,16 a
a3 = Konsorsium 2%	26,16 a
Penambahan kompos rami (B)	
b0 = Tanpa kompos	27,89 a
b1 = Kompos rami 125 g	29,67 a
b2 = Kompos rami 250 g	29,50 a

Keterangan: Nilai rata-rata perlakuan yang ditandai dengan huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Jarak Berganda Duncan pada taraf nyata 5%.

Jumlah Tunas Tanaman Rami

Pengaruh faktor jenis inokulan dan dosis kompos tidak menunjukkan adanya pengaruh interaksi, tetapi kedua faktor menunjukkan adanya pengaruh mandiri terhadap jumlah tunas tanaman rami. Nilai rata-rata jumlah tunas pada setiap taraf faktor perlakuan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengaruh mandiri inokulan dan kompos terhadap jumlah tunas rami

Perlakuan	Jumlah tunas
Penambahan inokulan (A)	
a0 = Tanpa inokulan	1,8 a
a1 = <i>A. vinelandii</i> 2%	2,3 a
a2 = <i>A. niger</i> 2%	3,3 ab
a3 = Konsorsium 2%	4,3 c
Penambahan kompos rami (B)	
b0 = Tanpa kompos rami	2,2 a
b1 = Kompos rami 125 g	3,8 b
b2 = Kompos rami 250 g	4,0 b

Keterangan: Nilai rata-rata perlakuan yang ditandai dengan huruf yang sama tidak berbeda nyata menurut Uji Lanjut Jarak Berganda Duncan pada taraf nyata 5%.

Data pada Tabel 5 menunjukkan nilai pengaruh mandiri inokulan terhadap jumlah tunas tanaman rami. Perlakuan penambahan bioagen konsorsium (*A. vinelandii* dan *A. niger*)

menunjukkan peningkatan pembentukan tunas rami tertinggi secara signifikan dibanding perlakuan lainnya. Perlakuan konsorsium bioagen menghasilkan nilai yang lebih tinggi untuk jumlah tunas dibandingkan dengan taraf faktor perlakuan lainnya. Hal ini karena adanya peran *A. vinelandii* sebagai penyedia N dan penghasil fitohormon auksin (IAA) yang dikombinasikan dengan *A. niger* sebagai mikroba petrofilik yang mampu mendegradasi hidrokarbon dapat mengurangi derajat toksisitas hidrokarbon dalam tanah, dibantu adanya pasokan N dan fitormon dari *A. vinelandii* dapat membantu dalam proses pembentukan tunas tanaman rami. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Suryatmana *et al.* (2024) dan Ali (2015), bahwa bakteri pemfiksasi N seperti genus *Azotobacter* dapat menghasilkan auksin (IAA) dan menyediakan N yang berpengaruh terhadap peningkatan pertumbuhan tanaman dan meningkatnya jumlah tunas, panjang tunas, berat basah dan berat kering tunas.

Pengaruh mandiri faktor dosis kompos rami terhadap jumlah tunas tanaman rami menunjukkan bahwa taraf faktor perlakuan dengan dosis 125 g dan 250 g memiliki nilai berbeda nyata dengan taraf perlakuan tanpa penambahan kompos (kontrol). Hal ini disebabkan karena kompos dapat membantu meningkatkan porositas campuran tanah dan lumpur minyak yang dapat meningkatkan kinerja mikroba dan tanaman dalam menyediakan hara dan mendegradasi hidrokarbon minyak bumi (Juliani & Rahman, 2011). Selain itu kompos meningkatkan aerasi, memberikan ketersediaan nutrisi bagi mikroba fungsional penghasil fitohormon seperti *Azotobacter* dan bakteri pemfiksasi N lainnya. Hal ini sesuai dengan pernyataan Munawar dan Elfita (2015), bahwa kompos mampu berperan sebagai *bulking agent* yang dapat meningkatkan kebutuhan oksigen dan nutrisi yang diperlukan mikroba fungsional, sehingga kondisi ini memungkinkan terjadi pasokan N dan fitohormon di dalam tanah yang meningkatkan pembentukan tunas lebih tinggi dibandingkan tanpa penambahan kompos.

SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada setiap perlakuan aplikasi bioagen dan kompos rami terhadap efisinesi biodegradasi hidrokarbon dan tinggi tanaman tidak menghasilkan efek peningkatan yang signifikan. Akan tetapi aplikasi bioagen (*A. vinelandii*, *A. niger*, dan konsorsiumnya) secara signifikan dapat meningkatkan populasi jamur

petrofilik dibandingkan kontrol, dengan nilai berturut-turut 2,70 CFU/g tanah, 3,01 CFU/g tanah, dan 2,86 CFU/ g tanah. Aplikasi *A. niger* dan konsorsium dapat meningkatkan jumlah tunas rami secara signifikan dibandingkan aplikasi *A. vinelandii* dan kontrol, dengan hasil berturut-turut 3,3 dan 4,3 jumlah tunas. Aplikasi kompos rami dosis 125 g dan 250 g dapat meningkatkan jumlah tunas tanaman rami secara signifikan dibandingkan kontrol yaitu berturut-turut 3,8 dan 4,0 tunas. Faktor kunci keberhasilan proses fitoremediasi dalam menghilangkan polutan limbah minyak bumi adalah ketepatan dosis *bulking agent* yang digunakan dan penggunaan bioagen terseleksi dengan kinerja yang tinggi. Pada penelitian ini *A. vinelandii* dan *A. niger* belum memberikan efek yang signifikan terhadap kinerja fitoremediasi yang berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Adekunle, AA, and OA Adebambo. 2007. Petroleum hydrocarbon utilization by fungi isolated from *Detarium senegalense* (J. F Gmelin) seeds. *Journal of American Science*. 3(1): 69–76.
- Ali, M. 2012. Tinjauan Proses Bioremediasi Melalui Pengujian Tanah Tercemar Minyak. UPN Press. Surabaya.
- Abri, T Kuswinanti, EL Sengin, dan R Sjahrir. 2015. Isolasi cendawan rhizosfer penghasil hormone Indol Acetic Acid (IAA) pada padi aromatik Tanatoraja. *Prosiding Seminar Nasional Mikrobiologi Kesehatan dan Lingkungan*. Hlm. 28–36.
- Al-Nasrawi, H. 2012. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*. 3(4): 147. DOI: 10.4172/2155-6199.1000147.
- Aliyanta, B, LO Sumarlin, and AS Mujab. 2011. Penggunaan biokompos dalam bioremediasi lahan tercemar limbah lumpur minyak bumi. *Valensi*. 2(3): 14–25. DOI: 10.15408/jkv.v2i3.114.
- Aly, MM, HE El sayed, A Sayed, and SD Jastaniah. 2012. Synergistic effect between *Azotobacter vinelandii* and *Streptomyces* sp. isolated from saline soil on seed germination and growth of wheat. *Plant*. 8(5): 667–676.
- Cookson, JT. 1994. *Bioremediation Engineering: Design and Application*. McGraw-Hill. New York.
- Gautam, AK, S Sharma, S Avasthi, and R Bhadauria. 2011. Diversity, pathogenicity and toxicology of *A. niger*. An important spoilage fungi. *Research Journal of Microbiology*. 6(3): 270–280. DOI: 10.3923/jm.2011.270.280.
- Hamme, JDV, A Singh, and OP Ward. 2003. Recent advances in petroleum microbiology. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. 67(4): 503–549. DOI: 10.1128/MMBR.67.4.503–549.2003.
- Handrianto, P. 2018. Mikroorganisme pendegradasi TPH (Total Petroleum Hydrocarbon) sebagai agen bioremediasi tanah tercemar minyak bumi. *Jurnal SainHealth*. 2(2): 35–42. DOI: 10.51804/jsh.v2i2.287.35-42.
- Hardjowigeno, S. 2007. *Ilmu Tanah*. Edisi 6. Akademika Pressindo. Jakarta.
- Jadhav, S, S Sharma, and G Sibi. 2019. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons and factors influencing the degradation process. *Bioprocess Engineering*. 3(2): 6–11. DOI: 10.11648/j.be.20190302.12.
- Juliani, A, dan F Rahman. 2011. Bioremediasi lumpur minyak (*oil sludge*) dengan penambahan kompos sebagai bulking agent dan sumber nutrisi tambahan. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*. 3: 1–18. DOI: 10.20885/jstl.vol3.iss1.art1.
- Kogbara, RB, JM Ayotamuno, DC Worlu, and IF Manuel. 2015. A case study of petroleum degradation in different soil textural classes. *Recent Patents on Biotechnology*. 9(2): 108–115. DOI: 10.2174/2211550105666151110203337.
- Li, Z, Z Zheng, H Li, D Xu, X Li, L Xiang, and S Tu. 2023. Review on rice husk biochar as an adsorbent for soil and water remediation. *Plants*. 12(7): 1524. DOI: 10.3390/plants12071524.
- Lin, C, NK Cheruiyot, XT Bui, and HH Ngo. 2022. Composting and its application in bioremediation of organic contaminants. *Bioengineered*. 13(1): 1073–1089. DOI: 10.1080/21655979.2021.2017624.
- Mocek-Plóćiniak, A, J Mencil, W Zakrzewski, and S Roszkowski. 2023. Phytoremediation as an effective remedy for removing trace elements from ecosystems. *Plants (Basel)*. 12(8):1653. DOI: 10.3390/plants12081653.
- Munawar, dan Elfita. 2015. Biodiversitas bakteri indigen dan kontribusinya dalam pengelolaan lingkungan tercemar: Studi kasus beberapa wilayah di Indonesia. 1(6): 1359–1363. DOI: 10.13057/psnmbi/m010616.

- Navarro, A, and HC Garcia-Cruz. 2010. Biopolymers by *Azotobacter vinelandii*. Pp. 414–438. In Biopolymers (M Elnashar, Ed.). DOI: 10.5772/286.
- Purwanti, ND. 2008. Penambatan nitrogen secara biologis: Perspektif dan keterbatasannya. Wartazoa. 18(1): 9–17.
- Purwati, RD. 2010. Strategi pengembangan rami (*Boehmeria nivea* Gaud.). Perspektif: Review Penelitian Tanaman Industri. 9(2): 106–118. DOI: 10.21082/p.v9n2.2010.%p.
- Reiningtyas, R, dan Mahreni. 2015. Biosurfaktan. Eksergi. 12(2): 12–22. DOI: 10.31315/E.V12I2.1354.
- Reinhold-Hurek, B, W B nger, CS Burbano, M Sabale, and T Hurek. 2015. Roots shaping their microbiome: Global hotspots for microbial activity. Annual Review of Phytopathology. 53(1): 403–424. DOI: 10.1146/annurev-phyto-082712-102342.
- Sabah, G, ED Jatau, and CMZ Whong. 2016. Assessment of biodegradation ability of *Aspergillus niger* isolated from mechanic workshops soil refinery effluent and petroleum hydrocarbons. International Journal of Scientific and Research Publications. 6(3): 381–389.
- Salim, F, dan T Suryati. 2014. Fitoremediasi tanah tercemar minyak bumi menggunakan empat jenis rumput. Jurnal Riset Industri. 8(2): 123–128.
- Steliga, T. 2012. Role of fungi in biodegradation of petroleum hydrocarbons in drill waste. Polish Journal of Environmental Studies. 21(2): 471–479.
- Subowo, YB. 2014. Pengaruh pemberian pupuk hayati jamur terhadap pertumbuhan tanaman kacang tanah (*Arachis hypogea* L) pada tanah dengan salinitas tinggi. Prosiding Seminar Nasional Keanekaragaman dan Pemanfaatan Sumberdaya Mikroba Tropika Indonesia. Hlm. 130–136.
- Sudrajat, D, N Mulyana, dan A Adhari. 2014. Seleksi mikroba rizosfer lokal untuk bahan bioaktif pada inokulan berbasis kompos iradiasi. Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi. 10(1): 23–34.
- Suherman, C, A Nurainni, dan VSR Wulandari. 2017. Respons tiga klon tanaman rami (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud) terhadap konsentrasi asam giberelat yang berbeda. Jurnal Kultivasi. 16(3): 494–501. DOI: 10.24198/kultivasi.v16i3.14470.
- Sui, X, X Wang, Y Li, and H Ji. 2021. Remediation of petroleum-contaminated soils with microbial and microbial combined methods: Advances, mechanisms, and challenges. Sustainability. 13(16): 9267. DOI: 10.3390/su13169267.
- Suryatmana, P, and MR Setiawati. 2014. Potensi *Azotobacter* sp. ST.04 dan kompos *Azolla pinata* untuk meningkatkan efisiensi biodegradasi hidrokarbon dalam proses bioremediasi limbah minyak bumi. Jurnal Agroekoteknologi. 6(1): 31–40. DOI: 10.33512/j.agrtek.v6i1.224.
- Suryatmana, PP, E Kardenas, E Ratnaningsih, and Wisjnuapto. 2007. Improving the effectiveness of crude-oil hydrocarbon biodegradation employing *Azotobacter chroococcum* as co-inoculant. Microbiology Indonesia. 1(1): 5–10. DOI: 10.5454/mi.1.1.2.
- Suryatmana, P, S Handayani, S Bang, and R Hindersah. 2024. Screening and profiling of mercury-resistant *Azotobacter* isolated from gold mine tailing in Pongkor, West Java. Journal of Degraded and Mining Lands Management. 11(2): 5287–5300. DOI: 10.15243/jdmlm.2024.112.5287.
- Truskewycz, A, TD Gundry, LS Khudur, A Kolobaric, M Taha, A Aburto-Medina, AS Ball, and E Shahsavari. 2019. Petroleum hydrocarbon contamination in terrestrial ecosystems—fate and microbial responses. Molecules. 24(18): 3400. DOI: 10.3390/molecules24183400.
- Yang, KM, T Poolpak, and Pokethitiyook. 2023. Rhizodegradation: The plant root exudate and microbial community relationship. Pp. 209–229. In Phytoremediation: Management of Environmental Contaminants (L Newman, AA Ansari, SS Gill, M Naeem, R Gill, Eds). Springer International Publishing. Cham.