

EKSPLORASI POTENSI SPIRULINA DALAM PENANGANAN LIMBAH OLI BEKAS KENDARAAN

Andin Vita Amalia¹, Amnan Haris¹, Andhina Putri Heriyanti¹, Rizki Nor Amelia², Rifa'atunnisa¹, Tri Retnaningsih Soeprbowati³, Marcelinus Christwardana³

¹Ilmu Lingkungan, FMIPA, Universitas Negeri Semarang

²Pendidikan IPA, FMIPA, Universitas Negeri Semarang

³Doktor Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro

andinvitaamalia@mail.unnes.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.15294/ka.v5i1.273>

P-ISSN 2961-7448

ABSTRAK

Oli merupakan pelumas mesin kendaraan bermotor yang memiliki peran penting dalam menjaga kinerja dan umur panjang mesin. Namun, setelah digunakan, oli bekas harus segera diganti karena sifatnya yang sudah terdegradasi dan mengandung berbagai kontaminan berbahaya. Sayangnya, pengelolaan limbah oli bekas di masyarakat masih sangat terbatas. Oli bekas umumnya hanya dimanfaatkan untuk melumasi baut dan rantai, dicampur dengan solar sebagai bahan bakar alternatif, atau bahkan dibuang dan ditampung tanpa proses pengolahan yang memadai. Hal ini berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, terutama karena kandungan bahan kimia beracun dan logam berat yang dapat mencemari tanah dan badan air. Salah satu pendekatan yang mulai dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini adalah pemanfaatan mikroorganisme seperti mikroalga. Spirulina, salah satu jenis mikroalga, diketahui memiliki kemampuan sebagai agen bioremediasi yang efektif karena mampu menyerap polutan (bertindak sebagai sorben), mengubah senyawa berbahaya menjadi bentuk yang lebih

aman, serta mengakumulasikannya dalam struktur tubuhnya. Spirulina telah berhasil digunakan untuk mengolah berbagai jenis limbah, seperti limbah tahu, minyak jelantah, dan limbah industri batik. Karakteristik limbah oli yang memiliki kemiripan dengan minyak jelantah, terutama karena keduanya berasal dari fraksi minyak bumi, maka spirulina memiliki potensi besar untuk digunakan dalam bioremediasi limbah oli bekas.

Kata Kunci: jelantah, mikroalga, bioremediasi, logam berat, solar.

PENDAHULUAN

Limbah usaha bengkel, terutama limbah oli bekas, merupakan masalah lingkungan yang serius di Indonesia. Oli bekas mengandung senyawa beracun seperti logam berat dan hidrokarbon yang dapat mencemari tanah dan air jika tidak dikelola dengan benar. Dalam skala besar, limbah oli bekas dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang parah dan mengancam kesehatan manusia serta keberlanjutan ekosistem. Salah satu tantangan utama dalam pengelolaan limbah oli bekas adalah kurangnya kesadaran dan regulasi yang ketat. Banyak pengusaha bengkel masih belum memahami pentingnya pengelolaan limbah secara bertanggung jawab, sehingga seringkali limbah oli bekas dibuang secara sembarangan, baik dibuang ke sungai, dibakar, atau dikubur, yang semuanya berpotensi merusak lingkungan.

Namun demikian, ada upaya-upaya yang sedang dilakukan untuk mengatasi masalah ini. Pemerintah dan organisasi non-pemerintah bekerja sama dalam menyusun regulasi yang lebih ketat terkait pengelolaan limbah bengkel, termasuk limbah oli bekas. Program-program pendidikan lingkungan juga diperlukan untuk meningkatkan kesadaran para pemilik bengkel akan pentingnya pengelolaan limbah secara ramah lingkungan. Selain itu, teknologi juga dapat menjadi solusi. Teknologi daur ulang oli bekas telah berkembang dan dapat menjadi pilihan yang lebih ramah lingkungan daripada pembuangan konvensional, seperti

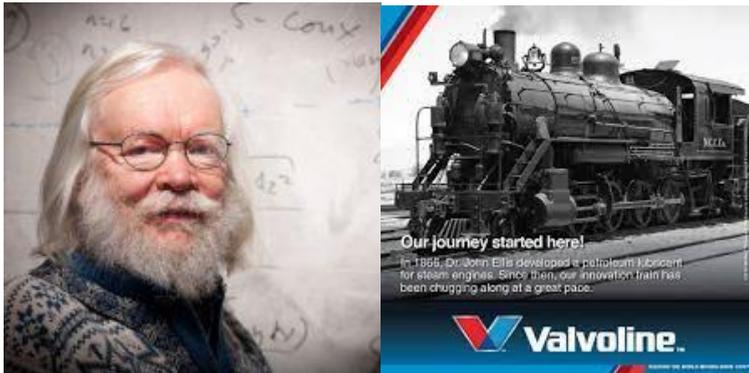
mengolah oli bekas menjadi solar untuk bahan bakar perahu dan truk. Dengan mengadopsi praktik-praktik pengelolaan limbah yang lebih baik, industri bengkel dapat berkontribusi secara positif terhadap pelestarian lingkungan dan keberlanjutan.

Secara keseluruhan, pengelolaan limbah usaha bengkel, termasuk limbah oli bekas, merupakan tantangan yang kompleks, namun dengan kesadaran, regulasi yang ketat, pendidikan, dan teknologi yang tepat, dapat diatasi untuk mendukung lingkungan yang lebih bersih dan sehat.

Sejarah Oli

Oli sudah menemani manusia berkendara sejak ditemukannya mesin uap. Sampai saat ini oli masih terus digunakan sebagai pelumas mesin. Meskipun teknologi mengalami perkembangan pesat, fungsi oli untuk meminimalisir aus karena gesekan permukaan mesin masih sulit tergantikan. Sejarah oli kendaraan mencakup perkembangan dari awal penggunaan kendaraan bermotor hingga era ini. Berikut adalah rangkaian peristiwa penting dalam sejarah oli kendaraan.

Oli mineral digunakan dalam Mesin Uap, pada abad ke-18 dan awal abad ke-19, sebagai pelumas dan pendingin. Ini menjadi awal penggunaan oli dalam konteks kendaraan bermotor. Penemu oli mesin, khususnya pelumas berbasis minyak bumi, adalah Dr. John Ellis. Ia mendirikan Valvoline pada tahun 1866, yang kemudian dikenal sebagai perusahaan pelumas minyak bumi pertama di dunia.



Gambar 1. Foto Dr. John Ellis, Penemu Oli Mesin dan Pendiri

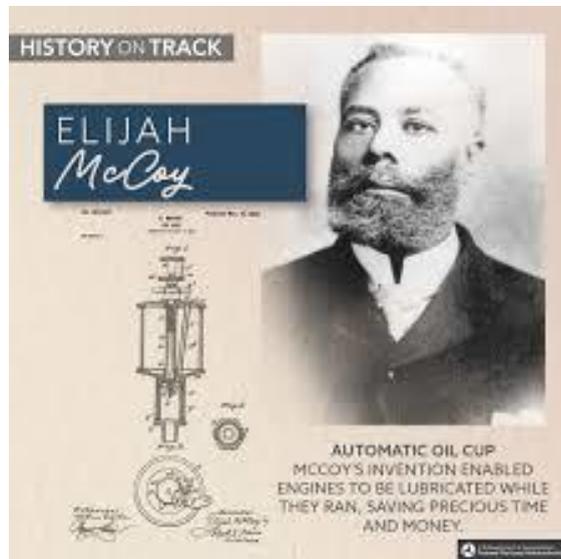
Valvoline

(Perusahaan Oli pertama di dunia)

Sumber:

<https://www.valvolineglobal.com/en/blog/frequently-asked-questions/the-original-behind-the-original/>

Elijah McCoy, meskipun dikenal sebagai "penemu" pelumasan otomatis, sebenarnya lebih dikenal karena penemuan sistem pelumasan otomatis pada mesin uap yang dipatenkannya, namun beliau bukan penemu oli itu sendiri. Leonardo da Vinci juga dianggap sebagai sosok penting dalam perkembangan pelumasan karena ia berusaha mengurangi gesekan dengan menciptakan sistem pelumasan untuk as roda, meskipun ia masih menggunakan lemak hewan atau minyak opium.



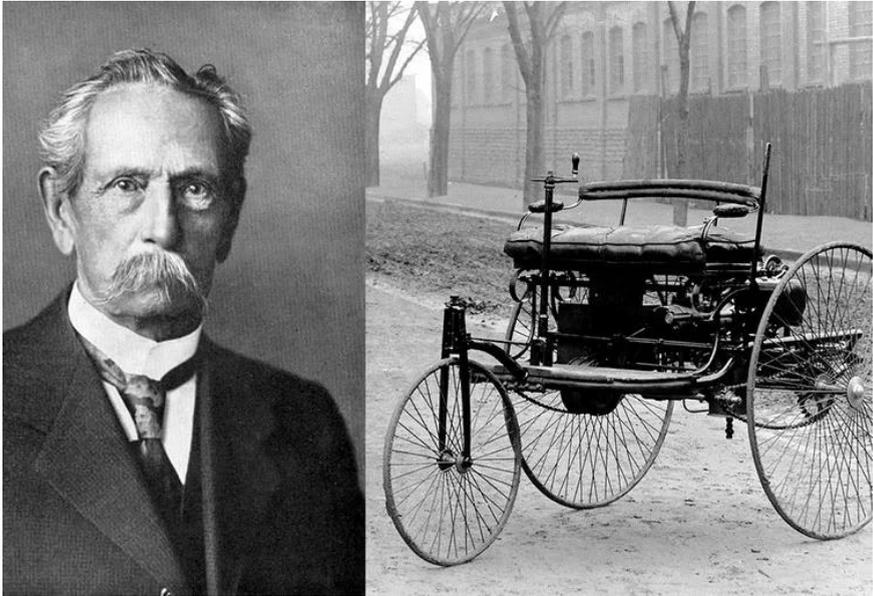
Gambar 2. Foto Elijah McCoy, penemu pelumasan otomatis (Sumber: Federal Railroad Administration) dan Leonardo da Vinci

Sumber:

<https://www.machinerylubrication.com/Read/32292/elijah-mccoy-a-founding-far-to-machinery-lubrication-real-mccoy>

Dalam perkembangan awal otomotif pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20, oli mulai digunakan dalam mesin pembakaran dalam kendaraan bensin. Mesin pembakaran dalam membutuhkan pelumas yang efisien untuk mengurangi

gesekan dan panas yang dihasilkan selama mesin beroperasi. Pada tanggal 29 Januari 1886, Carl Benz mengajukan paten untuk "kendaraannya yang digerakkan oleh mesin gas". Paten – nomor 37435 – dapat dianggap sebagai akta kelahiran mobil. Pada Juli 1886, surat kabar melaporkan peluncuran pertama Benz Patent Motor Car beroda tiga, model no. 1.



Gambar 3. Foto Karl Benz dan Motor Car ciptaannya
Sumber: <https://www.rri.co.id/ipitek/1120790/penemu-mobil-karl-benz>

Pada awal abad ke-20, industri oli kendaraan mulai berkembang dengan adanya permintaan yang meningkat dari pemilik kendaraan. Perusahaan-perusahaan besar seperti Shell, Mobil, dan Castrol menjadi pemain utama dalam industri ini.

Selama abad ke-20, terjadi berbagai inovasi dalam formulasi oli kendaraan, termasuk pengembangan oli sintesis yang lebih tahan terhadap suhu tinggi dan beban berat. Ini memungkinkan kendaraan untuk beroperasi dengan lebih efisien dan lebih lama.

Seiring kesadaran akan dampak lingkungan dari kendaraan bermotor, regulasi terkait emisi gas buang dan efisiensi bahan bakar semakin ketat. Hal ini mendorong industri oli untuk mengembangkan formulasi yang lebih ramah

lingkungan, seperti oli rendah emisi dan ramah lingkungan. Misal oli dari Eneos dan Pertamina Fastron Ecogreen.

Industri oli kendaraan terus berkembang dengan diversifikasi produk, termasuk oli khusus untuk kendaraan diesel, kendaraan berperforma tinggi, dan kondisi operasional khusus lainnya. Hal ini untuk memenuhi kebutuhan yang beragam dari pemilik kendaraan di seluruh dunia.

Peningkatan kualitas dan performa melalui penelitian dan pengembangan terus-menerus, Oli modern dapat memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap gesekan, panas, dan keausan, yang berkontribusi pada umur pakai yang lebih panjang dan kinerja yang lebih baik dari mesin kendaraan. Seiring dengan evolusi teknologi kendaraan, sejarah oli kendaraan terus berlanjut dengan inovasi-inovasi baru yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, kinerja, dan keberlanjutan.

Kegunaan Oli

Salah satu fungsi utama oli adalah sebagai pelumas untuk mengurangi gesekan antara komponen mesin yang bergerak. Oli membentuk lapisan pelindung di antara bagian-bagian mesin yang bergerak, seperti piston, poros engkol, dan katup, sehingga mengurangi keausan dan memperpanjang umur pakai mesin. Jika mesin kurang terlumasi, maka bagian-bagian mesin yang bergesekan dapat aus bahkan memanas sampai terbakar.

Oli juga berfungsi menghilangkan panas yang dihasilkan selama proses pembakaran di dalam mesin. Oli membawa panas dari area-area yang panas menuju area yang lebih dingin, di mana panas tersebut kemudian dapat diserap oleh sistem pendingin kendaraan. Oli membantu membersihkan mesin dengan mengangkut partikel-partikel kotoran dan endapan yang terbentuk selama operasi. Hal ini membantu menjaga kebersihan dan kinerja mesin dengan mengurangi risiko terjadinya penyumbatan atau kerusakan akibat endapan yang menumpuk.

Oli juga berfungsi sebagai segel antara bagian-bagian mesin untuk mencegah kebocoran gas pembakaran, minyak, atau pendingin. Segel yang baik membantu menjaga tekanan

yang diperlukan di dalam ruang bakar dan sistem lainnya untuk menjaga kinerja optimal mesin.

Beberapa formulasi oli memiliki sifat penyerap bunyi yang membantu mengurangi kebisingan yang dihasilkan oleh komponen-komponen mesin yang bergerak. Ini meningkatkan kenyamanan pengendaraan dan mengurangi gangguan suara yang tidak diinginkan.

Komponen yang sangat penting bagi kendaraan bermotor adalah oli karena berkontribusi secara signifikan terhadap kinerja, keandalan, dan umur pakai mesin. Penggunaan oli yang tepat dan penggantian secara teratur merupakan bagian penting dari perawatan rutin yang diperlukan untuk menjaga kendaraan dalam kondisi optimal.

Dampak Penggunaan Oli

Oli sebagai salah satu produk yang wajib ada untuk memperlancar mesin kendaraan tentunya memiliki dampak positif dan negatif. Adapun dampak positif ditinjau dari pertumbuhan ekonomi lokal. Oli yang digunakan dalam usaha bengkel memberikan kontribusi positif terhadap pertumbuhan ekonomi lokal dengan menciptakan lapangan kerja bagi penduduk setempat dan mendukung aktivitas perekonomian di sekitarnya.

Dampak positif lainnya adalah oli berguna untuk menjaga dan memperbaiki kendaraan bermotor, yang penting untuk menjaga keamanan dan kinerja kendaraan. Ini membantu pemilik kendaraan untuk memperpanjang umur pakai kendaraannya dan memastikan keamanan selama berkendara.

Pembuangan limbah oli yang bertanggung jawab dilakukan melalui bengkel yang sadar lingkungan telah mengadopsi praktik pembuangan limbah oli yang bertanggung jawab, seperti daur ulang oli bekas menjadi solar. Hal ini membantu mengurangi dampak negatif limbah oli terhadap lingkungan.

Salah satu dampak negatif utama dari usaha bengkel terkait limbah oli adalah pencemaran lingkungan. Pembuangan limbah oli secara tidak bertanggung jawab dapat mencemari tanah, air tanah, dan sumber air permukaan, mengancam ekosistem lokal dan kesehatan manusia.

Risiko Kesehatan Masyarakat: Pencemaran lingkungan oleh limbah oli bekas dapat menyebabkan risiko kesehatan bagi masyarakat yang tinggal di sekitarnya. Paparan terhadap senyawa beracun dalam oli bekas dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan pernapasan, penyakit kulit, dan masalah kesehatan lainnya. Seperti yang terjadi pada 2021 di salah satu keluarga di Kabupaten Sumedang keracunan karena tak sengaja menyantap kangkung yang bercampur oli. Keluarga ini terdiri dari 6 orang yang tinggal di Kampung Awilega, Desa Cikareo Utara.

Dampak terhadap Kesehatan Manusia

Secara spesifik, Oli Bekas dapat berdampak terhadap Kesehatan Manusia, sehingga perlu dibahas lebih mendalam. Oli bekas, yang merupakan limbah dari kendaraan bermotor dan industri lainnya, memiliki dampak yang signifikan terhadap kesehatan manusia ketika tidak dikelola dengan baik. Berikut adalah beberapa dampak yang perlu dipertimbangkan bahwa oli bekas mengandung senyawa beracun seperti logam berat (misalnya timbal, kadmium) dan hidrokarbon aromatik polisiklik (PAHs). Paparan terhadap senyawa-senyawa ini dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, termasuk gangguan pernapasan, iritasi kulit, kerusakan sistem saraf, dan bahkan kanker.

Jika oli bekas digunakan dalam proses pemanasan atau pembakaran di dalam ruangan yang tidak terventilasi dengan baik, dapat menghasilkan polutan udara dalam ruangan seperti asap dan partikel halus (PM₁₀). Paparan terhadap polutan udara dalam ruangan dapat meningkatkan risiko penyakit pernapasan dan kardiovaskular.

Pembuangan oli bekas secara tidak bertanggung jawab dapat menyebabkan kontaminasi air tanah dan permukaan serta tanah di sekitarnya. Ini dapat mengancam kualitas air minum dan mengganggu ekosistem air, yang pada gilirannya dapat memengaruhi kesehatan manusia melalui konsumsi air yang tercemar atau melalui rantai makanan (Bioakumulasi).

Di beberapa daerah, terutama di tempat-tempat terpencil atau pedesaan, pembakaran oli bekas untuk pemanasan atau memasak masih menjadi praktik umum. Hal ini meningkatkan

risiko paparan terhadap polutan udara dan senyawa beracun bagi masyarakat yang tinggal di sekitarnya.

Anak-anak lebih rentan terhadap dampak oli bekas karena sistem kekebalan dan perkembangan tubuh mereka yang belum sepenuhnya matang. Paparan terhadap senyawa beracun dalam oli bekas dapat menyebabkan gangguan perkembangan, gangguan neurologis, dan masalah kesehatan lainnya pada anak-anak.

Potensi dampak yang serius terhadap kesehatan manusia, penting untuk meningkatkan kesadaran akan bahaya oli bekas dan menerapkan praktik-praktik pengelolaan limbah yang aman dan bertanggung jawab, seperti daur ulang oli bekas dan pengelolaan limbah yang sesuai dengan regulasi lingkungan. Ini tidak hanya akan melindungi kesehatan manusia, tetapi juga membantu menjaga keberlanjutan lingkungan dan ekosistem.

PENGOLAHAN OLI BEKAS

Pengolahan limbah oli bekas merupakan proses yang penting untuk mengurangi dampak negatifnya terhadap lingkungan. Berikut adalah beberapa metode umum yang digunakan dalam pengolahan limbah oli bekas diantaranya daur ulang dan regenerasi.

Proses daur ulang oli bekas melibatkan penyaringan, pemurnian, dan pemulihan kembali ke kondisi yang sesuai untuk digunakan kembali sebagai pelumas. Daur ulang oli bekas mengurangi kebutuhan akan produksi oli baru dan mengurangi jumlah limbah yang dibuang ke lingkungan. Di sisi lain, regenerasi adalah oli bekas yang diolah untuk menghilangkan kontaminan dan kotoran sehingga dapat digunakan kembali. Regenerasi memungkinkan penggunaan kembali oli bekas tanpa harus melewati proses produksi oli baru secara keseluruhan. Dengan memulihkan oli bekas, kita dapat mengurangi limbah, menghemat biaya, dan meningkatkan performa peralatan.

Jika tidak memungkinkan untuk mendaur ulang atau meregenerasi oli bekas, metode lain yang dapat digunakan adalah pembakaran terkontrol. Proses pembakaran ini harus dilakukan dengan hati-hati dan menggunakan teknologi yang

tepat untuk mengurangi emisi polutan udara yang dihasilkan. Selain itu oli bekas yang telah diolah dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk industri-industri tertentu, seperti pemanasan industri atau pembangkit listrik. Namun, penggunaan ini harus diatur dengan ketat untuk memastikan bahwa proses pembakaran tidak menghasilkan emisi yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia.

Metode terakhir adalah penyimpanan dan pembuangan yang aman dari oli bekas. Ini termasuk pemisahan oli dari air dan tanah serta penyimpanan dalam wadah tertutup yang tahan bocor. Pembuangan akhirnya harus mematuhi regulasi lingkungan yang ketat untuk mencegah kontaminasi lingkungan.

Pengolahan limbah oli bekas membutuhkan kerja sama antara pemerintah, industri, dan masyarakat untuk memastikan bahwa metode yang digunakan aman, efisien, dan ramah lingkungan. Hal ini penting untuk melindungi lingkungan dan kesehatan manusia dari dampak negatif limbah oli bekas.

POTENSI MIKROALGA SPIRULINA DALAM MENGOLAH OLI BEKAS

Penggunaan mikroalga, seperti Spirulina, dalam pengolahan oli bekas adalah konsep yang menarik dalam upaya mendaur ulang limbah oli secara berkelanjutan. Pengolahan oli bekas menggunakan mikroalga dimulai dengan mengumpulkan oli bekas. Oli dikumpulkan dari sumber-sumber seperti bengkel otomotif, pabrik, atau tempat-tempat lain yang menghasilkan limbah oli. Setelah itu, mikroalga, seperti Spirulina, dikultivasi dalam lingkungan yang sesuai, seperti dalam tabung kaca atau photobioreactor (PBR) yang berisi air dan nutrisi yang diperlukan. Oli bekas berpotensi sebagai sumber karbon untuk pertumbuhannya.

Mikroalga yang tumbuh dalam lingkungan yang mengandung oli bekas akan menyerap oli dan mengubahnya menjadi komponen yang lebih ramah lingkungan. Proses ini dapat memakan waktu beberapa minggu tergantung pada kondisi lingkungan dan jenis mikroalga yang digunakan.

Setelah mikroalga menyerap oli bekas, langkah

selanjutnya adalah memisahkan mikroalga dari oli yang sudah tercerna. Oli yang sudah tercerna dapat dimurnikan lebih lanjut untuk menghilangkan kontaminan dan kotoran yang mungkin terbawa oleh mikroalga. Produk akhir dari proses ini dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar alternatif, bahan baku untuk produk-produk lainnya, atau bahkan sebagai bahan nutrisi tambahan untuk pakan ternak atau pupuk.

Penggunaan mikroalga seperti spirulina dalam pengolahan oli bekas memiliki beberapa potensi keuntungan, termasuk kemampuan untuk mendaur ulang limbah oli secara efisien, pengurangan logam berat, dan produk akhir yang lebih ramah lingkungan. Namun, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memastikan bahwa proses ini ekonomis dan dapat dilakukan dalam skala yang besar. Selain itu, perlu diperhatikan pula dampak lingkungan dan etis dari kultivasi mikroalga dalam jumlah besar untuk tujuan industri.

Bioremediasi oli bekas menggunakan mikroalga seperti *Spirulina* telah menjadi fokus penelitian dalam dekade terakhir karena potensinya yang besar dalam mengatasi pencemaran lingkungan secara berkelanjutan. Mikroalga menawarkan mekanisme detoksifikasi ganda melalui penyerapan polutan, degradasi enzimatis, dan produksi biomassa bernilai tinggi.

MEKANISME BIOREMEDIASI OLEH MIKROALGA

Proses bioremediasi oli bekas oleh mikroalga melibatkan tiga mekanisme utama biosorpsi dan bioakumulasi, degradasi enzimatis, dan produksi biosurfaktan. Sel *Spirulina* mampu menyerap hidrokarbon melalui dinding sel yang mengandung polisakarida bermuatan negatif, membentuk kompleks dengan kontaminan hidrofobik⁵. Studi menunjukkan kapasitas adsorpsi *Chlorella vulgaris* mencapai 94% minyak mentah dalam 14 hari. Di sisi lain, mikroalga menghasilkan enzim oksidatif seperti alkana monooksigenase dan sitokrom P450 yang memecah rantai hidrokarbon menjadi senyawa kurang toksik. *Spirulina platensis* terbukti mengurangi COD (Chemical Oxygen Demand) hingga 90% pada limbah mengandung minyak melalui metabolisme mixotropik. Hal berbeda jika *Spirulina* berperan sebagai biosurfaktan alami dengan senyawa seperti fikosianin yang dapat meningkatkan

bioavailabilitas hidrokarbon dengan mengurangi tegangan permukaan.

Efektivitas *Spirulina* dalam Remediasi Oli, ditunjukkan dari eksperimen menggunakan *Spirulina platensis* pada limbah industri menunjukkan penurunan konsentrasi total petroleum hydrocarbon (TPH) sebesar 72-98% dalam 7-20 hari. Selain itu kemampuan adaptasi pada rentang salinitas 10-100 g/L, memungkinkan aplikasi di lingkungan laut. Kondisi lengkapnya dapat dicapai dari sisi efisiensi bioremediasi optimal pada pH 7-8 dan suhu 25-30°C dengan rasio C:N:P 100:16:13

Tabel 1. Studi Komparatif Mengungkapkan Kinerja Beberapa Spesies Mikroalga

Spesies	Efisiensi Remediasi	Waktu (hari)	Konsentrasi Awal (mg/L)
<i>Chlorella vulgaris</i>	94% TPH	14	115
<i>Spirulina platensis</i>	88% COD	10	500
<i>Scenedesmus acutus</i>	82% Chromium	7	50

Integrasi dengan Bioremediasi Bakteri

Kombinasi mikroalga-bakteri meningkatkan efisiensi degradasi hidrokarbon melalui simbiosis mutualistik: Bakteri menyediakan CO₂ untuk fotosintesis mikroalga, sementara mikroalga menghasilkan oksigen untuk respirasi bakteri. Penggunaan biosurfaktan bakteri (misalnya rhamnolipid) bersama fikosianin dari *Spirulina* meningkatkan desorpsi oli dari sedimen hingga 70%. Konsorsium *Spirulina-Pseudomonas* mencapai degradasi 80% diesel dalam 5 hari.

Kendala dan Solusi Teknis

Beberapa tantangan dalam aplikasi skala besar meliputi toksisitas sekunder: Akumulasi logam berat bersama hidrokarbon memerlukan pendekatan multiremediasi. *Spirulina* terbukti mampu menyerap timbal (Pb) hingga 0.62 mg/10⁵ sel secara paralel. Nutrisi tambahan: Sistem semi-

kontinu dengan penambahan urea dan fosfat meningkatkan produktivitas biomassa 2-3 kali lipat. Pemisahan biomassa dilakukan dengan teknik flokulasi menggunakan chitosan- AlCl_3 mencapai efisiensi 95% dengan biaya rendah.

Valorisasi Biomassa Hasil Remediasi

Biomassa hasil proses bioremediasi mengandung Protein (60-70%) untuk pakan ternak, lipid (15-30%) sebagai bahan baku biodiesel, Eikosianin (hingga 20% berat kering) untuk industri farmasi. Studi siklus hidup menunjukkan integrasi bioremediasi-valorisasi biomassa dapat mengurangi biaya operasional hingga 40%.

Prospek dan Rekomendasi

Penelitian masa depan perlu fokus pada rekayasa strain toleran oli tinggi melalui mutagenesis atau CRISPR pengembangan sistem fotobioreaktor hibrida dengan sensor IoT. Analisis daur hidup (LCA) terintegrasi untuk optimasi ekonomi-sirkular. Dengan efisiensi remediasi mencapai >90% dan potensi valorisasi biomassa yang tinggi, aplikasi *Spirulina* dan mikroalga lain menawarkan solusi berkelanjutan untuk masalah oli bekas. Implementasi skala industri memerlukan kolaborasi multidisiplin antara ahli bioteknologi, kimiawan, dan insinyur lingkungan.

PENUTUP

Pendekatan berbasis mikroorganisme, khususnya pemanfaatan *Spirulina*, menawarkan alternatif yang menjanjikan untuk menangani permasalahan limbah, termasuk limbah oli bekas. *Spirulina* menunjukkan kemampuan luar biasa sebagai agen bioremediasi, dengan peran menyerap polutan, mengubah zat berbahaya menjadi bentuk yang lebih aman, serta menyimpannya dalam struktur tubuhnya. Keberhasilan aplikasinya pada limbah tahu, minyak jelantah, dan limbah batik memperkuat potensi tersebut. Karena kemiripan sifat antara limbah oli dan minyak jelantah, *Spirulina* berpeluang besar untuk diterapkan dalam pengolahan limbah oli bekas secara efisien dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariasya, M. A., & Sani, A. A. (2020). Proses Pengolahan Limbah B3 (Oli Bekas) Menjadi Bahan Bakar Cair Dengan Perlakuan Panas Konstan. *Austenit*, *12*(2), 48-53.
- Basra, I., Silalahi, L., Pratama, W. D., & Joelyna, F. A. (2023). Pretreatment of palm oil mill effluent (POME) for *Spirulina* cultivation. *Journal of Emerging Science and Engineering*, *1*(2), 57-62.
- Blanco-Vieites, M., Suárez-Montes, D., Delgado, F., Álvarez-Gil, M., Battez, A. H., & Rodríguez, E. (2022). Removal of heavy metals and hydrocarbons by microalgae from wastewater in the steel industry. *Algal Research*, *64*, 102700.
- Deng, S., Ma, J., Guo, Y., Chen, F., & Fu, Q. (2018). One-step modification and nanofibrillation of microfibrillated cellulose for simultaneously reinforcing and toughening of poly (ϵ -caprolactone). *Composites Science and Technology*, *157*, 168-177.
- Du, F., Li, C., Li, D., Sa, X., Yu, Y., Li, C., ... & Wang, J. (2022). Research progress regarding the use of metal and metal oxide nanoparticles as lubricant additives. *Lubricants*, *10*(8), 196.
- Hadiyanto, H., Haris, A., Muhammad, F., Afiati, N., & Khoironi, A. (2021). Interaction between styrofoam and microalgae *Spirulina platensis* in brackish water system. *Toxics*, *9*(3), 43.
- Heong, K. L., Lu, Z. X., Chien, H. V., Escalada, M., Settele, J., Zhu, Z. R., & Cheng, J. A. (2021). Ecological engineering for rice insect pest management: the need to communicate widely, improve farmers' ecological literacy and policy reforms to sustain adoption. *Agronomy*, *11*(11), 2208.
- Ifuku, S., & Yano, H. (2015). Effect of a silane coupling agent on the mechanical properties of a microfibrillated cellulose composite. *International journal of biological macromolecules*, *74*, 428-432.
- Juwita, M., Faizal, M., Said, M., Prianto, J., Hartawan, R. A., & Aprianti, N. (2022). Synthesis of Crude Palm Oil-Based Polyol Ester as Biolubricant. *Rekayasa: Jurnal Penerapan Teknologi dan Pembelajaran*, *19*(2), 62-74.

- Malchiodi, B., Cedillo-González, E. I., Siligardi, C., & Pozzi, P. (2022). A practical valorization approach for mitigating textile fibrous microplastics in the environment: collection of textile-processing waste microfibers and direct reuse in green thermal-insulating and mechanical-performing composite construction materials. *Microplastics*, 1(3), 393-405.
- Nugraha, E. D., Mellawati, J., Wahyudi, Kranrod, C., Makhsun, Tazoe, H., ... & Tokonami, S. (2022). Heavy metal assessments of soil samples from a high natural background radiation area, Indonesia. *Toxics*, 10(1), 39.
- Pietrzak, S., Wójcik, J., Baszuk, P., Marciniak, W., Wojtyś, M., Dębniak, T., ... & Lener, M. R. (2021). Influence of the levels of arsenic, cadmium, mercury and lead on overall survival in lung cancer. *Biomolecules*, 11(8), 1160.
- Prambodo, M. S., Hariyati, R., & Soeprbowati, T. R. (2016). Spirulina platensis geitler sebagai fikoremediator logam berat Pb skala laboratorium. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 18(2), 64-69.
- Rodrigues, J. R. D. S., Santos, R. D. S., Matos, R. A., Pires, J. C., & Salgado, E. M. (2023). Sustainable Microalgal Harvesting Process Applying Opuntia cochenillifera: Process Parameters Optimization. *Applied Sciences*, 13(2), 1203.
- Soni, R. A., Sudhakar, K., & Rana, R. S. (2019). Comparative study on the growth performance of Spirulina platensis on modifying culture media. *Energy Reports*, 5, 327-336.
- Tabagari, I., Varazi, T., Chokheli, L., Kurashvili, M., Pruidze, M., Khatisashvili, G., ... & Fragstein und Niemsdorff, P. V. (2022). Enhancement of Spirulina platensis remediation action using biosurfactants for wastewater treatment. *International Journal of Environmental Research*, 16(1), 14.
- Utomo, A. P., Nindyapuspa, A., Primaningtyas, W. E., Rizal, M. C., & Lia, A. Y. R. (2021). Analisis logam berat dalam oli bekas, limbah serbuk marmer, dan semen portland sebagai bahan pembuatan batako. *Jurnal Teknologi Maritim*, 4(2), 494134.
- Vijayarasa, J., Pakeerathan, K., Thiruchchelvan, N., & Mikunthan, G. (2021, May). Bio-Remediation of Agro-Based Industries' Wastewater and Mass Production of

- Spirulina (*Spirulina platensis* (Gomont) Geitler 1925). In *Biology and Life Sciences Forum* (Vol. 3, No. 1, p. 24). MDPI.
- Witkowska, D., Słowik, J., & Chilicka, K. (2021). Heavy metals and human health: Possible exposure pathways and the competition for protein binding sites. *Molecules*, 26(19), 6060.
- Wulansarie, R., Chafidz, A., Pratikno, H., Rengga, W. D. P., Afrizal, F. J., Dwipawarman, A., ... & Arifin, R. (2020, April). Effectiveness of ozonation process on treating tofu industrial liquid waste: effect of pH conditions. In *Materials Science Forum* (Vol. 981, pp. 336-341). Trans Tech Publications Ltd.
- Yudha, V., Rochardjo, H. S., Yudhanto, F., & Hariyanto, S. D. (2021). Cellulose Microfibers from Salacca Midrib Fiber Isolated by the Mechanical Treatment. *Jurnal Selulosa*, 11(1), 1-8.
- Zgłobicki, W. (2022). Special issue on heavy metals in the environment—Causes and consequences. *Applied Sciences*, 12(2), 835.