



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



REKAYASA PROSES BIOLOGI **Penerapannya pada Bidang Teknik Lingkungan** **untuk Pengendalian Pencemaran**

Profesor Edwan Kardena
Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB
18 Mei 2024

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

REKAYASA PROSES BIOLOGI:
PENERAPANNYA PADA BIDANG TEKNIK LINGKUNGAN
UNTUK PENGENDALIAN PENCEMARAN

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

REKAYASA PROSES BIOLOGI:
PENERAPANNYA PADA BIDANG TEKNIK LINGKUNGAN
UNTUK PENGENDALIAN PENCEMARAN

Prof. Edwan Kardena

18 Mei 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

**REKAYASA PROSES BIOLOGI: PENERAPANNYA PADA BIDANG TEKNIK
LINGKUNGAN UNTUK PENGENDALIAN PENCEMARAN**

Penulis : Prof. Edwan Kardena

Reviewer : Prof. Agus Mochamad Ramdhan

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-440-1

e-ISBN : 978-623-297-441-8 (PDF)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132

☎ +62 22 20469057

🌐 www.itbpress.id

✉ office@itbpress.id

Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
APPTI No. 005.062.1.10.2018

PRAKATA

Tulisan ini Penulis beri judul *Rekayasa Proses Biologi: Penerapannya Pada Bidang Teknik Lingkungan untuk Pengendalian Pencemaran*. Sebagai Guru Besar di bidang bioproses teknik lingkungan, Penulis ingin memberikan gambaran bagaimana proses biologi, khususnya konsep-konsep pengetahuan tentang mikrobiologi dapat dijumpai dengan rekayasa menghasilkan teknologi-teknologi inovasi dalam bidang teknik lingkungan yang berguna untuk mengendalikan pencemaran. Sebagian besar isi tulisan ini adalah pengalaman lapangan penulis dalam mengimplementasikan konsep-konsep dasar proses biologi yang dikembangkan di laboratorium. Sebagian konsep-konsep, hasil hasil laboratorium ini juga telah dituliskan dalam bentuk paper yang telah terbit pada jurnal-jurnal maupun prosiding konferensi. Sebagian besar juga menjadi bahan pengajaran berbagai matakuliah di teknik lingkungan seperti mata kuliah Teknik Remediasi, Pengolahan Lumpur, dan Pengelolaan Limbah Industri.

Terima kasih yang tak terhingga Penulis sampaikan kepada rekan kerja, kolaborasi pada grup penelitian di KK Rekayasa Air Limbah dan Limbah Cair (KK RALC), khususnya kepada Dr. Qomarudin Helmy, Dr. Syarif Hidayat, Prof. Agus Jatnika Efendi, Dr. Sri Harjati Suhardi (Reni) dari Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati, sebagai kolaborator sejak masa PAU Bioteknologi ITB, dan Dr. Rudy Laksmono, *ex* bimbingan S3 (sekarang dosen di UNHAN) yang juga menjadi partner Penulis pada kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Penulis juga berterima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu kegiatan dalam penelitian dan pengabdian masyarakat, khususnya kepada Kemendikbud/Ristek, ITB melalui P2MI, serta pihak swasta yang telah mempercayakan pekerjaan yang berbasis penelitian untuk *problem solving* di tempatnya, kepada kami. Ucapan terima kasih Penulis sampaikan juga kepada para mahasiswa bimbingan baik S3, Magister, maupun S1 yang telah terlibat dalam penelitian-penelitian yang Penulis kerjakan bersama grup penelitian di dalam KK RALC. Penulis juga sampaikan terima kasih kepada Ketua KK RALC, Prof. Mindriany Syafila yang secara penuh mendukung kegiatan-kegiatan Penulis. Terima kasih dan hormat juga disampaikan kepada guru Penulis yaitu Prof. Dr. Ir. Wisjnuprpto (purnabakti Guru Besar Teknik Lingkungan ITB), yang telah “memaksa” Penulis untuk belajar mikrobiologi/bioteknologi

lingkungan. Beliau pulalah yang membimbing Penulis semasa menjadi peneliti di PAU Bioteknologi ITB dan dosen muda di Teknik Lingkungan ITB.

Semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas kebaikan semuanya.

Bandung, 18 April 2024

Edwan Kardena

SINOPSIS

Setelah menjelaskan beberapa definisi, di bagian awal dari tulisan ini Penulis menggambarkan bagaimana seorang *mikrobiologist* memahami fenomena alam dari sisi pandang keilmuannya, lalu bagaimana seorang insinyur menganalisis dan mengembangkan pemikiran rekayasa sehingga kemudian muncul suatu teknologi yang efisien dan ekonomis. Hal ini digambarkan dengan bagaimana proses di kolam stabilisasi mengilhami munculnya teknologi lumpur aktif (*activated sludge*). Pada bagian berikutnya Penulis menjelaskan bakteri yang bertahan pada lingkungan-lingkungan yang ekstrem, serta bakteri yang bisa menggunakan substrat-substrat spesifik. Informasi ini penting sebagai landasan bagaimana bakteri-bakteri jenis ini bisa berperan dan digunakan untuk berperang melawan senyawa-senyawa atau zat zat pencemar yang tidak mudah terurai di lingkungan, khususnya lingkungan air dan tanah.

Penulis kemudian membahas selintas mengenai peraturan-peraturan terkait lingkungan, kemudian menuliskan sedikit kaitannya dengan pengendalian pencemaran dan teknologi lingkungan yang sudah ada dan sering diaplikasikan. Pada bagian berikutnya Penulis, lebih fokus pada penggunaan proses biologi pada pemulihan lahan tercemar. Pencemaran tanah ini Penulis pilih untuk lebih dikedepankan dan dibahas karena selama ini teknologi lingkungan untuk pemulihan lahan tercemar masih belum banyak berkembang. Teknologi-teknologi bioremediasi penulis bahas dari mulai *land farming*, *Aerated Biopile*, dan *on-site bioremediation*. Semua yang ditulis adalah pengalaman Penulis dalam mengimplementasikan hasil-hasil pekerjaan laboratorium, kemudian menjadi suatu desain dan dilaksanakan di lapangan. Walaupun sebagian data-data tersebut sudah menjadi *book chapter*, juga paper yang terbit di jurnal-jurnal dan prosiding konferensi, sebagian lain berupa foto-foto adalah koleksi yang Penulis ambil sendiri pada saat *monitoring* pekerjaan lapangan maupun pekerjaan laboratorium. *On-site bioremediation* adalah istilah yang Penulis ajukan untuk menjelaskan metode *eksitu* tetapi dikerjakan *on-site*. Pada umumnya *eksitu bioremediation* itu adalah mengangkat tanah tercemar kemudian mentransportasikan ke lokasi pengolahan yang umumnya berjarak cukup jauh dari lokasi pencemaran. *On-site bioremediation* Penulis tujukan untuk

metode *eksitu*, tapi tidak melibatkan transportasi. Tanah tercemar diangkat kemudian diolah di tempat bekas galian tanah tersebut, atau kalau tidak memungkinkan diolah di samping lokasi pencemaran awal. Beberapa foto/gambar yang Penulis perhatikan, diberikan sebagai *gift* untuk penulis dari seorang kawan yang mengambil Doktor dengan bimbingan seorang profesor yang sama di univeritas yang sama, yaitu Prof. John Howard Slater (Cardiff University, UK), tetapi pada periode sebelum Penulis memulai riset. Nama dari kawan tersebut adalah Dr. Mc Niclure yang menjadi pengajar di Flinders University, Australia. Nick menjadi kolaborator Penulis tahun 2000 dan dia sangat banyak pengalamannya di bidang bioremediasi. Yang bersangkutan pada saat itu mengelola Flinders *Bioremediation* Pte (sebuah perusahaan yang dimiliki oleh Flinders University). Sayangnya Nick meninggal dunia 1-2 tahun setelah Kami berkolaborasi. Banyak salindia, contoh-contoh *bioremediation projects* yang ia berikan kepada Penulis.

Untuk melengkapi bagaimana proses biologi ini kegunaannya cukup luas di bidang teknik lingkungan, Penulis memberikan contoh bagaimana proses biologi juga bisa diaplikasikan untuk pencemar yang bukan senyawa organik, dalam hal ini logam berat berupa merkuri. Merkuri dengan proses biologi dapat ditransformasikan dari merkuri (II) menjadi merkuri elemental yang sangat volatil. Bakteri yang resisten terhadap merkuri di alam, dicari dan diseleksi, kemudian diaplikasikan dalam memulihkan lahan tercemar oleh merkuri. Walaupun dalam kasus merkuri ini baru pada tahapan pekerjaan skala laboratorium, namun proses biologi untuk mentransformasi merkuri (II) menjadi merkuri elemental berhasil dilakukan. Merkuri kemudian lepas ke udara sebagai Hg^0 , lalu di-*adsorp* menggunakan karbon aktif. SEM EDX memperlihatkan keberadaan merkuri pada permukaan karbon aktif yang dipakai untuk menyerap merkuri hasil biotransformasi. Pada bagian berikutnya sebelum bagian penutup, Penulis menjelaskan bagaimana tahap tahap penyediaan bakteri maupun produk bakteri (berupa *biosurfactant*) dari mulai isolasi, *enrichment*, seleksi sampai penyiapan untuk aplikasi lapangan dalam bentuk yang mudah untuk ditangani (bubuk, pasta, maupun cair). Dengan masih banyaknya materi biologi, bakteri yang belum tereksplorasi, maka ilmu bioproses untuk teknik lingkungan ini masih terbuka untuk berkembang, dan terbuka untuk menghasilkan inovasi-inovasi teknologi lingkungan sebagai alternatif bagi teknologi lain yang berbasis proses fisika maupun proses kimia.

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| PRAKATA..... | v |
| SINOPSIS | vii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR GAMBAR..... | xi |
| 1 PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Rekayasa Proses Biologi..... | 1 |
| 1.2 Mikroba di Lingkungan Ekstrem | 7 |
| 1.3 Adaptasi Mikroba pada Lingkungan Ekstrem | 9 |
| 1.4 Mengapa Mikroba Mampu Mengurai Senyawa Organik yang Toksik | 11 |
| 2 PENGENDALIAN PENCEMARAN LINGKUNGAN | 15 |
| 2.1 Pembangunan yang Berkelanjutan | 15 |
| 2.2 Peraturan Terkait Lingkungan | 15 |
| 2.3 Pencemaran Lingkungan..... | 16 |
| 2.4 Pengendalian Pencemaran Lingkungan..... | 16 |
| 2.5 Teknologi Pengolahan/Pemulihan Lingkungan..... | 18 |
| 3 PROSES BIOLOGI UNTUK PEMULIHAN LAHAN TERCEMAR | 21 |
| 3.1 Studi Keterolahan (<i>Treatability Study</i>) | 21 |
| 3.2 Pemulihan Lahan Tercemar pada Skala Pilot (<i>Pilot Scale</i>)..... | 27 |
| 3.3 Teknologi pemulihan tanah pada skala penuh | 29 |
| 3.4 Peran <i>Biosurfactant</i> di Dalam Pemulihan Lahan Tercemar Minyak Bumi. | 37 |
| 3.5 Proses Biologi untuk <i>Heavy Metal</i> | 38 |
| 4 MIKROBA PETROFILIK: DARI LAB KE APLIKASI LAPANGAN..... | 43 |
| 4.1 Isolasi, Seleksi dan Pengayaan | 43 |
| 4.2 Penyiapan Produk | 45 |
| 4.3 Aplikasi Lapangan..... | 47 |
| 5 PENUTUP..... | 49 |
| 6. UCAPAN TERIMA KASIH | 51 |
| DAFTAR PUSTAKA | 53 |
| CURRICULUM VITAE | 55 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-------------------|--|----|
| Gambar 1 | Diagram kolam stabilisasi untuk pengolahan air limbah (Kadri SUT, et al, 2021) | 3 |
| Gambar 2 | Foto kolam stabilisasi Bojong Soang, yang mengolah Sebagian air limbah domestik kota Bandung. (Foto diambil dari Herald Jabar, terbitan 15 Maret 2022). | 3 |
| Gambar 3. | Diagram proses proses biologi tanpa resirkulasi, diagram proses biologi dengan resirkulasi (<i>Activated sludge</i> jenis <i>Complete Mixed/CMAS</i>); dan paling bawah, diagram proses biologi jenis <i>plug-flow</i> | 5 |
| Gambar 4. | Profil pertumbuhan mikroba yang mengikuti bentuk Bel. | 12 |
| Gambar 5. | <i>Flowchart</i> diambil dari John T Cookson, 1995, dan diterjemahkan ke dalam Bahasa Indonesia. | 22 |
| Gambar 6. | Percobaan laboratorium <i>slurry bioreactor</i> (E. Kardena*) | 24 |
| Gambar 7. | Hasil percobaan laboratorium untuk aplikasi bioremediasi fase cair <i>slurry-bioreactor</i> (E. Kardena*) | 25 |
| Gambar 8. | Percobaan <i>Aerated Biopile</i> skala laboratorium (E. Kardena*) | 26 |
| Gambar 9. | Percobaan skala laboratorium untuk aplikasi bioremediasi <i>ek-situ landfarming</i> (E. Kardena*) | 27 |
| Gambar 10. | <i>Biopile</i> skala pilot di area Daop 2 PT KAI. Dokumentasi <i>workshop</i> bioremediasi, PAU Bioteknologi, 1997. | 28 |
| Gambar 11. | Percobaan skala pilot <i>on-site bioremediation</i> . (E. Kardena*) | 28 |
| Gambar 12. | Teknik bioremediasi <i>wind row</i> . Foto adalah courtesy dari Dr. Mc Niclure (Flinders University)..... | 30 |
| Gambar 13. | Contoh aplikasi skala lapangan <i>landfarming</i> di Indonesia (E. Kardena*) | 31 |
| Gambar 14. | Desain perpipaan dasar <i>biopile</i> (E. Kardena*) | 32 |
| Gambar 15. | Pelaksanaan pekerjaan kontruksi dasar <i>biopile</i> (E. Kardena*) | 33 |
| Gambar 16. | Metode <i>biopile</i> dan hasil pengukuran penurunan pencemar selama proses berlangsung (Gambar dan | |

| | | |
|-------------------|---|----|
| | grafik, courtesy dari Dr. Mc Niclure, Flinders University) | 33 |
| Gambar 17. | Konstruksi liner dan perpipaan untuk <i>biopile</i> terbalik dan contoh monitoring penurunan TPH selama proses <i>on-site</i> bioremediasi. (E. Kardena*) | 36 |
| Gambar 18. | Proses <i>on-site bioremediation</i> : pengadukan, penambahan <i>bulking agent</i> , pengadukan tahap operasional (E. Kardena*)..... | 37 |
| Gambar 19. | Aplikasi <i>biosurfactant</i> pada pembersihan bata karang tercemar crude oil tumpahan minyak di pantai (E. Kardena*)..... | 38 |
| Gambar 20. | Percobaan <i>recovery</i> minyak dari <i>sludge</i> atau tanah yang minyak berat (E. Kardena*) | 38 |
| Gambar 21. | Pathway merkuri di alam (Driscoll et al, 2013) | 39 |
| Gambar 22. | Transformasi merkuri di dalam sel (Gregoire dan Poulian, 2014)..... | 40 |
| Gambar 23. | Langkah-langkah percobaan untuk mendapatkan bakteri yang tahan terhadap merkuri dan aplikasi skala laboratorium remediasi lahan terkontaminasi merkuri secara biologi menggunakan bakteri tersebut..... | 41 |
| Gambar 24. | Hasil dari SEM dan EDX memperlihatkan keberadaan merkuri pada permukaan karbon aktif..... | 41 |
| Gambar 25. | Pra DED bioremediasi tanah terkontaminasi merkuri dengan capping anaerob dan dilengkapi dengan kolom karbon aktif untuk menangkap merkuri volatile (E. Kardena*)..... | 42 |
| Gambar 26. | Proses isolasi dan enrichment di laboratorium (E. Kardena*)..... | 43 |
| Gambar 27. | Seleksi bakteri petrofilik unggul (E. Kardena*) | 44 |
| Gambar 28. | Penyiapan bakteri di laboratorium, desain tangka pengayaan dan pengayaan bakteri menggunakan tangki yang sudah didesain dan dibangun (E. Kardena*) | 46 |
| Gambar 29. | Penyiapan bakteri dalam bentuk powder (E. Kardena*) | 47 |
| Gambar 30. | Pengeringan konsentrate bakteri dan crude <i>biosurfactant</i> (E. Kardena*)..... | 47 |

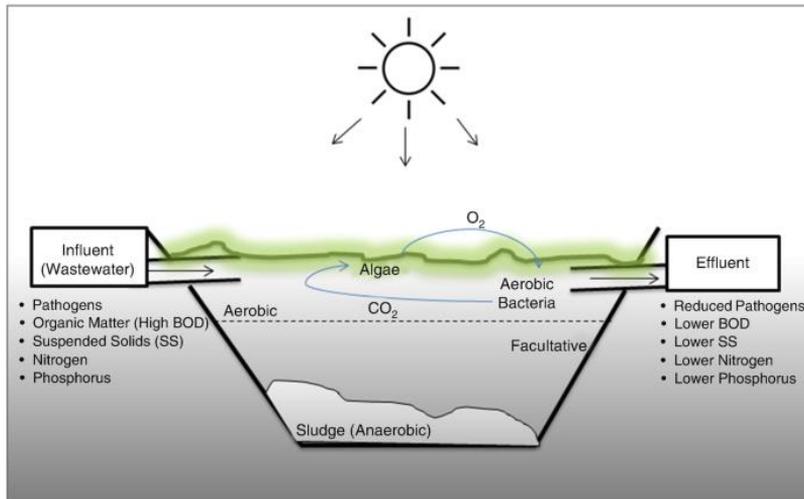
1 PENDAHULUAN

1.1 Rekayasa Proses Biologi

Rekayasa Proses biologi atau *bioprocess* mengajarkan dan mengembangkan inovasi berlandaskan proses biologi. Proses biologi sendiri sering diartikan sebagai setiap proses yang menggunakan sel hidup untuk menciptakan, mendesain suatu sistem yang kompleks, material ataupun membantu dalam meningkatkan efisiensi. Dalam bidang Teknik Lingkungan, rekayasa proses biologi ini ditujukan untuk menciptakan suatu sistem, proses, teknologi yang berguna untuk menyisihkan, mengurangi keberadaan zat pencemar di alam, atau untuk memulihkan lingkungan yang tercemar oleh pencemar organik. Keberadaan rekayasa proses biologi ini adalah sebagai alternatif terhadap proses fisika dan proses kimia yang telah berkembang dan dikenal lebih dahulu. Ketiga proses tersebut biasanya diterapkan atau dipakai secara sendiri sendiri, dua kombinasi atau tiga kombinasi didalam mengembangkan teknologi pengolahan air limbah dan tanah tercemar. Rekayasa Proses Biologi juga sering didefinisikan sebagai suatu simbiosis antara bioteknologi atau mikrobiologi dengan rekayasa. Pemahaman yang mendalam terhadap suatu proses yang melibatkan sel hidup, umumnya berupa bakteri, jamur, dan algae, lalu dikombinasikan dengan pemahaman konsep rekayasa maka akan tercipta suatu teknologi yang berlandaskan proses biologi.

Kita sering menemukan di kampung-kampung Jawa Barat atau mungkin juga di tempat lain di luar Jawa Barat, kolam-kolam ikan atau empang dipakai sebagai sumber air untuk kegiatan sanitasi, seperti mandi, cuci, maupun kakus. Di daerah paling hulu biasanya mata air atau saluran punggung yang membawa air bersih dari mata air dijadikan sebagai sumber air utama. Setelah digunakan untuk kegiatan sanitasi, Air limbahnya dibuang atau mengalir ke kolam atau empang pertama. Kemudian di bagian hilir kolam pertama ini air kolam digunakan pula untuk kegiatan sanitasi dan air limbahnya mengalir atau dialirkan ke kolam kedua dan seterusnya. Walaupun kolam kolam tersebut berfungsi juga sebagai penerima air limbah, dengan kata lain menerima beban pencemaran, tetapi pada umumnya setelah melalui masa tinggal di kolam tersebut airnya mengalami proses pembersihan secara natural sehingga kemudian dapat digunakan kembali sebagai sumber air untuk kegiatan yang sama. Konon kegiatan mandi cuci kakus seperti di atas

juga di lakukan oleh masyarakat Eropa Selatan yang suhunya mendekati tropis. Kolam kolam dipakai sebagai sarana untuk mengolah air limbah domestik secara tradisional. Sedikit sekali pemahaman saintifik tentang fenomena pemulihan fungsi kolam pada saat itu, seperti bagaimana dan kenapa kolam tidak menjadi kotor setelah sekian lama digunakan sebagai tempat membuang air limbah. Belakangan kemudian para *microbiologist* menemukan pemahanan tentang aktivitas algae di dalam kolam yang terlibat dalam proses fotosintesis. Oksigen di dalam kolam selalu tersedia melalui konversi karbon dioksida dengan bantuan sinar matahari. Penetrasi sinar matahari yang tidak bisa terlalu dalam menyebabkan bagian atas dari kolam ini lebih memiliki kondisi aerob atau berkecukupan oksigen. Proses konversi pencemar organik yang kemudian dikenal dengan ukuran satuan BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) menjadi senyawa yang sederhana dan menghasilkan produk samping berupa CO₂, selanjutnya terjadi dengan bantuan mikroorganisme berupa bakteri (pengurai). Bakteri-bakteri yang bekerja menyisihkan polutan di bagian kolam yang berkecukupan oksigen dikenal sebagai bakteri aerob, pada umumnya berada pada bagian atas kolam di mana algae sangat aktif dalam proses fotosintesa yang menghasilkan oksigen. Bagian dasar kolam yang relatif dalam di mana oksigen tidak tersedia dihuni oleh bakteri bakteri anaerob (tidak membutuhkan oksigen) yang melakukan proses konversi yang mirip dalam mengubah BOD menjadi senyawa yang sederhana dan menghasilkan *methane* (CH₄). Jika kolam cukup dalam, maka biasanya ada bagian tengah yang disebut sebagai fakultatif. Fenomena natural ini kemudian kita kenal sebagai suatu teknologi sederhana untuk mengolah air limbah, yaitu Kolam Stabilisasi (*Stabilization Ponds*). Walaupun termasuk teknologi paling tua dalam pengolahan limbah dan sedikit sekali sentuhan rekayasa, kolam stabilisasi ini masih banyak dipakai tidak saja di Indonesia tapi juga dibelahan dunia lain yang memiliki kecukupan lahan. Kolam stabilisasi juga dipakai untuk mengolah ¼ air limbah domestik penduduk Kota Bandung. Kolam ini terletak di daerah Bojong Soang Kabupaten Bandung yang dikelola oleh PDAM Kota Bandung.



Gambar 1 Diagram kolam stabilisasi untuk pengolahan air limbah (Kadri SUT, et al, 2021)

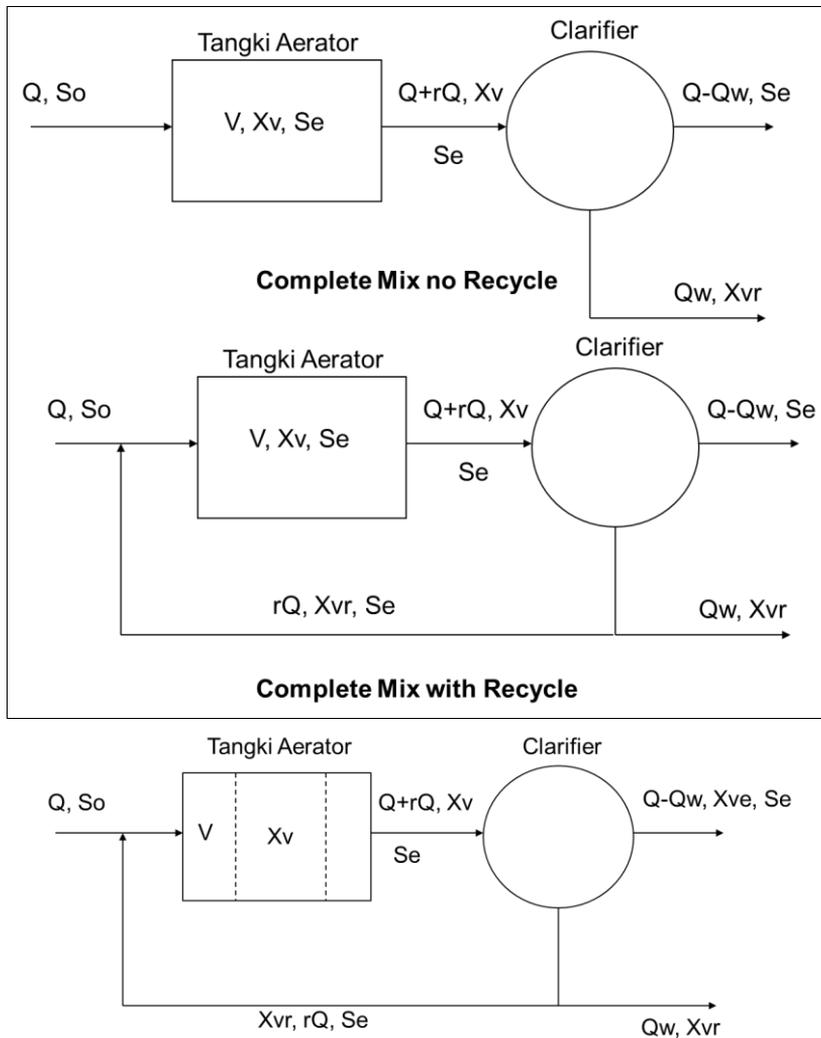


Gambar 2 Foto kolam stabilisasi Bojong Soang, yang mengolah Sebagian air limbah domestik kota Bandung. (Foto diambil dari Herald Jabar, terbitan 15 Maret 2022).

Ketika rekayasa berkembang, kemudian para insinyur turut mengamati dan mempelajari proses biologi dalam kolam tersebut. Hal yang dipertanyakan adalah apakah harus selalu dibutuhkan kolam yang sangat luas (sebagai contoh Kolam Stabilisasi di Bojong Soang, memiliki total luas 60 hektar). Apa yang menyebabkan dibutuhkan kolam yang demikian luas. Pertanyaan-pertanyaan seputar peran dan bagaimana mikroba atau bakteri dalam menyisihkan BOD menjadi bahan diskusi antara *microbiologist* dan insinyur. Dari interaksi antara sains dan rekayasa kemudian muncul konsep waktu tinggal hidrolis, waktu tinggal lumpur (umur lumpur), hubungan

antara umur lumpur dengan konstanta pertumbuhan spesifik (specific growth). Teknologi kolam stabilisasi kemudian berkembang menjadi teknologi lumpur aktif (*Activated Sludge*) pada awal abad ke-20 dan juga memanfaatkan persamaan matematika yang dikembangkan oleh Monod. Parameter parameter proses penting seperti umur lumpur, konstanta saturasi, konstanta pertumbuhan spesifik maksimum, perolehan (*Yield*) kemudian muncul dan dipergunakan di dalam desain instalasi lumpur aktif untuk mengolah air limbah domestik juga air limbah industri. Demikian sekedar contoh sederhana bagaimana rekayasa proses biologi berkembang. Pada saat ini teknologi lumpur aktif pun telah berkembang sejalan dengan berkembangnya ilmu bioteknologi lingkungan. Aklimatisasi secara buatan terhadap mikroorganisma *indigenous* untuk mendapatkan mikroba unggul sudah biasa dilakukan. Metode seleksi untuk mendapatkan mikroba tertentu yang dapat mendegradasi senyawa polutan spesifik juga sudah berkembang maju sehingga misalnya konsep BOD/COD yang secara tradisional dipakai untuk mempertimbangkan mudah tidaknya air limbah diolah dengan pendekatan proses biologi atau harus dengan pendekatan yang lain menjadi kurang relevan. Suatu air limbah yang memiliki rasio BOD/COD 0,5 umumnya dianggap mudah terdegradasi secara biologi. Ukuran COD (*Chemical Oxygen Demand*) dipakai untuk memperlihatkan konsentrasi atau keberadaan pencemar organik yang tidak mudah terdegradasi secara biologi. Namun dengan proses seleksi yang baik, mikroba unggul dapat diperoleh sehingga apabila dipakai sebagai lumpur dalam instalasi pengolahan air limbah lumpur aktif dapat menyisihkan tidak saja BOD, tetapi juga sebagian besar COD.

Pada Gambar 3 bagian atas diperlihatkan diagram proses biologi tanpa dilengkapi dengan fasilitas resirkulasi lumpur. Ini menggambarkan suatu sistem kolam namun dilengkapi aerasi (*aerated lagoon*). Diagram bagian Tengah memperlihatkan lumpur aktif (dengan resirkulasi) yang diasumsikan tercampur sempurna (*completely mixed activated sludge*). Gambar 3 Bagian paling bawah memperlihatkan diagram proses untuk lumpur aktif dengan jenis aliran *plug-flow*.



Gambar 3. Diagram proses biologis tanpa resirkulasi, diagram proses biologis dengan resirkulasi (*Activated sludge* jenis *Complete Mixed/CMAS*); dan paling bawah, diagram proses biologis jenis plug-flow

Proses biologis yang terjadi pada teknologi lumpur aktif kemudian juga dianggap menjadi salah satu contoh dari penerapan bioteknologi untuk bidang lingkungan. Lumpur aktif (*activated sludge*) telah memenuhi syarat untuk dapat dimasukkan ke dalam bioteknologi atas dasar bahwa proses biologis tersebut dapat di kontrol. Pertanyaannya adalah, di mana letak kontrol pada proses biologis di dalam lumpur aktif? Di masa lampau, proses lumpur aktif dikontrol oleh apa yang disebut sebagai *Food per Microorganism Ratio*, atau *F/M*. *Food* adalah substrat yang memasuki tangki aerasi dalam satu hari .

Substrat dalam hal ini diwakili oleh BOD, sedangkan Mikroorganisma diwakili oleh total berat lumpur sebagai MLSS di dalam tangka aerasi. Angka F/M bisa bergerak dari paling kecil mendekati 0,1 dan paling besar mendekati 0.5 (dalam pendapat lain bisa mendekati angka 1.0). Jika F/M akan diubah maka caranya adalah dengan mengubah F atau mengubah M. Mengubah F adalah tidak mungkin karena effluent yang masuk ke tangka aerasi tidak bisa kita kontrol. Tangki aerasi dari lumpur aktif akan harus menerima effluent apa adanya. Sebaliknya mengubah (memperbesar atau memperkecil M tidak mungkin juga. Resirkulasi tidak bisa mengubah M. Angka M ini terkait dengan growth, atau pertumbuhan mikroorganisma. Growth juga diatur oleh jenis substrat dan jenis mikroorganisma. Mengayur jenis substrat sama saja dengan mengatur *effluent*, dan ini tidak mungkin dapat atau boleh dikontrol. Sehingga kemudian F/M ini menjadi sulit dijadikan parameter yang dapat dipakai untuk mengatur proses biologi. Satu satunya cara mengubah M (menaikkan atau menurunkan) adalah dengan membuang lumpur. Di dalam setiap instalasi pengolahan air limbah dengan teknologi lumpur aktif, pasti memiliki fasilitas untuk membuang lumpur. Tergantung dari jenis atau tipe lumpur aktifnya, tetapi pada umumnya fasilitas ini diletakan pada pipa lumpur resirkulasi, sehingga konsentrasi MLSS pada pembuangan lumpur akan sama dengan konsentrasi MLSS pada pipa resirkulasi lumpur. Pembuangan lumpur sama dengan mengatur umur lumpur (*sludge age*) atau Mean Cells Retention Time (MCRT). Dengan demikian pengaturan umur lumpur ini menjadi cara suatu instalasi pengolahan air limbah dengan teknologi lumpur aktif diatur. Jika terlalu tinggi konsentrasinya, maka lumpur yang dibuang (dengan cara membuka valve di pipa pembuangan) harus banyak. Jika lumpur dibuang cukup banyak, maka umur lumpur menjadi lebih pendek, dengan kata lain secara tidak langsung populasi mikroorganisma yang didukung supaya dominan adalah yang umur lumpurnya pendek atau yang konstanta pertumbuhan spesifiknya besar, dan ini cocok untuk mengolah air limbah yang kandungan organiknya dari kelompok mudah terdegradasi. Sebaliknya apabila diinginkan untuk mengolah air limbah yang mengandung bahan organik sulit diurai secara biologi, maka lumpur yang dibuang harus sedikit. Hal ini kemudian secara tidak langsung akan mendorong mikroorganisma yang memiliki konstanta pertumbuhan spesifik yang kecil, dominan di dalam tangki aerasi. Dengan kata lain, terjadi dinamika populasi di dalam tangki aerasi yang diatur dengan cara menutup dan membuka valve pada bagian pipa pembuangan lumpur. Mekanisme kontrol seperti inilah yang dapat dilakukan

secara nyata pada saat operai suatu sistem lumpur aktif, dan oleh karenanya lumpur aktif dapat disebutkan sebagai suatu contoh bioteknologi dalam bidang lingkungan. Fasilitas pembuangan lumpur pada instalasi pengolahan air limbah dengan sistem lumpur aktif dapat dilihat pada Gambar 3 dengan notasi Qw, Xvr.

1.2 Mikroba di Lingkungan Ekstrem

Hampir tidak ada lingkungan yang steril. Di alam ini mikroba dapat ditemukan di mana saja, bahkan di lingkungan yang ekstrem. Di mana makhluk hidup yang lebih kompleks akan sulit bertahan. Keanekaragaman mikroba di dunia ini sangatlah tinggi. Diperkirakan baru 30% nya saja diketahui manusia, sedangkan sisanya tetap menjadi wilayah para saintis melakukan eksplorasi dalam rangka mencari spesies-spesies baru. Diyakini bahwa masih banyak lagi jenis atau spesies yang mungkin memiliki potensi aplikasi di bidang industri, kesehatan, maupun lingkungan. Para *microbiologist* menjelajahi laut dalam dengan peralatan kapal selam tanpa awak untuk mengambil sampel di dasar laut mencari mikroba yang *survive* pada tekanan atmosfer yang sangat tinggi. Ada yang melakukan eksplorasi ke kawah kawah gunung api, hutan tropis yang belum pernah diinjak manusia, bahkan mencari mikroba di perut rayap untuk mencari mikroba yang bisa melapukkan kayu. Berikut ini beberapa contoh lingkungan ekstrem di mana mikroba masih bisa ditemukan.

Lingkungan dengan pH rendah (asam)

Mikroba yang bertahan hidup di lingkungan dengan pH yang rendah dikenal dengan nama *Acidophilic* (menyukai lingkungan asam). Lingkungan lingkungan asam baik secara alami atau akibat pencemaran menjadi sumber untuk isolasi mikroba jenis ini. Kondisi proses di suatu industri tidak selalu dilakukan pada pH netral. Terkadang harus berlangsung pada pH yang ekstrem (asam). Menaikan pH ke level normal membutuhkan biaya yang tinggi sehingga jika proses itu dapat dikerjakan dengan pendekatan proses biologi maka mengaplikasikan mikroba penyuka lingkungan asam akan lebih mudah dan murah. Selain daripada itu, saintis berharap bahwa enzim-enzim yang bisa diperoleh dari mikroba tersebut dapat pula memiliki aktivitas pada pH yang rendah.

Lingkungan dengan pH tinggi (basa)

Mikroba yang bertahan hidup di lingkungan dengan pH yang tinggi dikenal dengan nama *Basophilic* (menyukai lingkungan basa). Lingkungan basa bisa terbentuk secara alami maupun terjadi akibat adanya pencemaran. Sampel sampel lingkungan (bisa tanah ataupun air) yang diambil dari daerah seperti ini menjadi sumber untuk isolasi mikroba penyuka lingkungan basa. Seperti halnya *acidophilic*, mikroba *basophilic* ini diharapkan dapat digunakan sebagai biocatalyst proses-proses yang harus dilakukan pada pH tinggi. Selain itu juga enzim-enzim yang didapat dari mikroba jenis ini diharapkan bisa tahan dan memiliki aktivitas pada pH yang tinggi.

Lingkungan dengan temperatur tinggi

Mikroba yang justru hidup memerlukan temperatur tinggi (di atas 70 °C) disebut sebagai *thermophilic*. Jika memerlukan temperatur yang lebih tinggi lagi disebut *hyper thermophilic*. Mikroba mikroba jenis ini akan sangat berguna untuk digunakan sebagai *biocatalyst* proses yang berlangsung pada suhu tinggi. Jika suhu diturunkan terlebih dahulu maka akan memakan biaya yang tinggi, sehingga akan lebih menguntungkan jika tetap dilangsungkan pada suhu tinggi, tetapi dengan *biocatalyst* yang bisa tetap aktif pada suhu tinggi. Saintis juga mencari enzim-enzim yang tidak rusak pada suhu tinggi, dan berharap itu dapat diekstraksi dari mikroba *thermophilic* ini.

Lingkungan dengan temperatur rendah

Sebaliknya dengan *thermophilic*, mikroba yang menyukai lingkungan dengan suhu rendah, dikenal dengan nama *cryophilic*. Mikroba jenis ini berguna untuk dijadikan sebagai *biocatalyst* pada lingkungan dengan suhu yang rendah. Dalam bidang Teknik Lingkungan misalnya, mikroba jenis ini akan berguna untuk melakukan proses pengolahan limbah ataupun pemulihan tanah tercemar secara biologi pada lokasi yang memiliki suhu yang rendah.

Lingkungan dengan substrat yang spesifik

Lingkungan dengan substrat yang spesifik adalah lingkungan yang memiliki kandungan senyawa (umumnya pencemar) yang spesifik karena tidak biasa atau tidak umum ditemukan di lingkungan. Sebagai contoh misalnya mikroba yang dikenal dengan sebutan *petrophilic*, mikroba dengan ini menyukai lingkungan yang memiliki konsentrasi senyawa *petroleum hydrocarbon*

(hidrokarbon minyak bumi) yang tinggi. Biasanya ini ditemukan di lingkungan (baik tanah maupun air) yang sudah lama tercemar oleh minyak bumi. Mikroba jenis ini sangat berguna didalam proses pemulihan lahan tercemar minyak bumi ataupun menjadi sumber mikroba/lumpur instalasi pengolahan air limbah secara biologi (lumpur aktif) yang mengolah air limbah dari industri migas. Contoh yang lain adalah misalnya enzim dehalogenase yang diekstrak dari mikroba yang menjadikan senyawa-senyawa organik terhalogenasi sebagai substrat nya. Senyawa terhalogenasi seperti 2,4-D (*2,4-Dichlorophenoxyacetic acid*), *Pentachlorophenol*, *1,2-dichloroethane*, DDT, *1,6-dichlorohexane*, *Chloroaniline*, banyak yang menjadi pencemar di lingkungan perairan atau pun tanah sebagai akibat dari aktivitas manusia yang membuang limbah mengandung bahan-bahan tersebut. Memiliki mikroba yang dapat mendegradasi senyawa-senyawa tersebut tentu akan sangat menguntungkan. Aktivitas manusia yang berdampak positif terhadap ekonomi dapat terus berlanjut tanpa menimbulkan dampak yang signifikan.

1.3 Adaptasi Mikroba pada Lingkungan Ekstrem

Setelah mengetahui tentang keberadaan mikroba pada lingkungan ekstrem, konsep adaptasi perlu dikembangkan, bagaimana mikroba yang dipergunaan didalam pengolahan air limbah atau pemulihan tanah tercemar oleh bahan organik yang tidak mudah terdegradasi dapat dikembangkan. Secara natural keberadaan bahan kimia sebagai pencemar di alam akan diimbangi dengan peroses adaptasi dari mikroba-mikroba *indigenous*. Ketika alam untuk pertama kalinya menerima bahan atau senyawa aneh yang tidak dikenalnya sebagai akibat dari kegiatan manusia yang mengharuskan pembuangan limbah, maka pada saat itu alam akan tertekan lalu seiring dengan waktu akan dapat beradaptasi dengan keadaan tersebut. Sebagai contoh, pada tahun 60an, produk bahan kimia untuk pertanian (pestisida, herbisida) diperkenalkan oleh industri dan mulai banyak dipergunakan pada saat itu. Dalapon sebagai merk dagang yang berbahan aktif senyawa organik terklorinasi (chlorinated compound) 2,2-DCPA (*2,2-dichloropropionic acid*), banyak dipergunakan. Pada saat itu 2,2-DCPA bersama-sama dengan senyawa yang mirip seperti 2-MCPA (*2-Monochloropropionic acid*), DCA (*Dichloroacetic acid*), MCA (*Monochloroacetic acid*) dikenal sebagai senyawa yang cukup persisten di lingkungan. Belum banyak riset pada bidang ini dan oleh karenanya belum

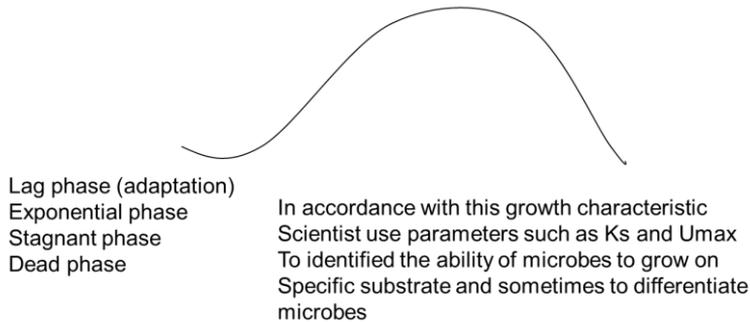
banyak diketahui tingkat degradabilitas dari senyawa-senyawa tersebut, akan tetapi secara umum senyawa-senyawa tersebut sebagai senyawa pencemar yang sulit terdegradasi di alam. Namun pada akhir 70an, mulai banyak riset dan laporan tentang degradasi senyawa tersebut diantaranya oleh bakteri *Pseudomonas putida* PP3. Saat ini bahan-bahan kimia tersebut tidak lagi digunakan karena sudah mudah terurai di alam dan sebagai gantinya diproduksi bahan-bahan kimia yang lebih stabil (sulit terdegradasi) dan kemudian alam harus mulai lagi beradaptasi sehingga bisa menangani keberadaan senyawa tersebut. Ketika suatu senyawa produksi manusia ini (man-made chemical) ini sudah dapat ditangani oleh alam, maka siklus kemudian berulang, manusia kembali menciptakan senyawa yang lebih kompleks dan alam dibantu para saintis melakukan adaptasi sehingga kemudian kembali bisa mengadaptasikan dirinya sendiri baik oleh sendirinya secara natural maupun dibantu para peneliti (saintis) pada bidang ini. Secara tradisional, pekerjaan adaptasi atau aklimatisasi yang dilakukan oleh insinyur pada bidang lingkungan di dalam suatu operasi pengolahan air limbah adalah dengan menggunakan tangki aerasi itu sendiri. Dengan mengatur proporsi antara air limbah asli dengan air limbah sintesis yang mengandung bahan organik yang mudah terdegradasi pada rasio bertahap. Pada awal aklimatisasi limbah asli jauh lebih kecil proporsinya (misalnya 25% limbah asli 75% limbah yang mudah terdegradasi); samapi diakhir aklimatisasi komposisi menjadi 100% limbah asli. Untuk limbah yang mengandung polutan spesifik, metode seperti ini akan memakan waktu lama dengan kemungkinan kegagalan. Pendekatan yang bisa dilakukan sebagai alternatif adalah dengan melakukan proses seleksi sejak awal, sehingga yang dikembangkan di laboratorium pada tahap awal adalah mikroba yang sudah diketahui mampu mendegradasi polutan spesifik tersebut. Percobaan tersebut menggunakan konsep aseptik, jadi semua dalam kondisi steril. Ketika ini akan dikembangkan ke skala lapangan, problem kontaminasi mungkin saja terjadi, namun secara keseluruhan metode yang mengadopsi metode mikrobiologi dalam konsep engineering dapat membantu tingkat keberhasilan dan mungkin mereduksi biaya aklimatisasi. Untuk memahami lebih jauh bagaimana proses adaptasi atau aklimatisasi ini terjadi maka perlu untuk memahami bagaimana mikroba bisa tumbuh dan kenapa pula mampu menggunakan senyawa organik yang toksik sebagai sumber karbon untuk pertumbuhannya.

1.4 Mengapa Mikroba Mampu Mengurai Senyawa Organik yang Toksik

Bagaimana mikroba tumbuh berkembang biak?. Mikroba atau bakteri yang merupakan makhluk hidup berupa sel ini seperti halnya makhluk hidup yang lebih kompleks, menggunakan substrat (makanan) berupa senyawa organik (jenis mikroba *heterotroph*) sebagai sumber carbon (C) dan energinya. Untuk mendukung pertumbuhannya tersebut, selain sumber karbon, mikroba juga akan membutuhkan sumber nitrogen (N) dan sumber phosphor (P). Ketiga jenis unsur ini menjadi kebutuhan utama pertumbuhan dan membutuhkan suatu rasio tertentu tergantung jenis dan kondisi lingkungan tertentu. Rasio yang dimaksud adalah rasio C:N:P. Ada berbagai angka yang sering digunakan, misalnya 150:5:1 atau angka rasio yang lain. Untuk mendapatkan rasio yang lebih akurat, percobaan laboratorium sering dilakukan, sehingga angka rasio tersebut menjadi angka yang mendekati kebutuhan nyata dan memberikan proses pertumbuhan yang paling baik. Selain sumber C, N, dan P yang sering disebut sebagai sumber nutrisi utama, mikroba atau bakteri ini juga memerlukan sumber mineral yang monovalent dan divalent ion termasuk juga logam-logam. Cukup banyak jenis mineral yang umumnya diperlukan sebagai faktor pendukung pertumbuhan pada konsentrasi yang kecil dan oleh karenanya sering disebut sebagai *trace element*. Sumber karbon yang mudah dipergunakan oleh mikroba untuk pertumbuhan adalah karbohidrat, kemudian protein, kemudian lemak (lipid). Pada prinsipnya senyawa yang menyerupai sugar (gula) akan menjadi sumber karbon yang mudah diurai dan memberikan pertumbuhan yang cepat. Substrate seperti Glukosa, Molase sering dipergunakan di laboratorium ataupun di lapangan untuk memperoleh pertumbuhan mikroba yang bagus. Pada kenyataannya substrat atau sumber karbon tersebut, yang mudah terurai, tidak selalu terdapat di alam. Dalam konteks pemanfaatan bioproses untuk menguraikan pencemar berupa senyawa organik, senyawa-senyawa pencemar tersebut umumnya sulit diuraikan atau sulit terdegradasi. Pencemar-pencemar organik yang mejadi tantangan bagi proses biologi adalah senyawa-senyawa yang relatif stabil, persistent, bahkan tak jarang senyawa-senyawa tersebut adalah toksik. Tantangannya adalah bagaimana mikroba atau bakteri-bakteri *indigenous* tersebut dapat menggunakan senyawa-senyawa organik yang tidak mudah terdegradasi tersebut menjadi sumber C dan sumber energi untuk pertumbuhannya.

The growth profile

- Follow bell shape



Gambar 4. Profil pertumbuhan mikroba yang mengikuti bentuk Bel.

Kemampuan tumbuh mikroba tersebut didorong oleh fakta bahwa mikroba memerlukan C, N dan P sebagai *precursor* untuk sintesa sel nya. C, N, dan P adalah komponen utama dari pembentuk sel, oleh karenanya maka ketiga unsur tersebut adalah yang paling diperlukan untuk pertumbuhan. Sel mikroba mengkonversi makannya (*substrat*) menjadi bahan-bahan pembentuk sel (katabolisme) dengan bantuan enzim yang dihasilkan secara intra seluler (*catabolic enzyme*). Precursor tersebut kemudian disintesa menjadi sel-sel baru (anabolisme) juga dengan bantuan enzim, sehingga proses ini secara keseluruhan disebut metabolisme. Dalam konteks teknik lingkungan, proses katabolisme (penguraian senyawa kompleks menjadi senyawa yang sederhana), atau setengah pertama dari metabolisme dijadikan dasar-dasar proses biologi untuk mengembangkan teknologi lingkungan.

Pada bagian sebelumnya telah disinggung masalah adaptasi atau aklimatisasi untuk membuat mikroba atau bakteri menjadi mampu mendegradasi polutan organik yang awalnya sulit terdegradasi. Lalu bagaimana mikroba atau bakteri ini dapat di dorong untuk bisa mengurai senyawa-senyawa polutan yang sulit terdegradasi. Sebelum menjawab hal ini, penting dibahas terlebih dahulu apa penyebab suatu senyawa organik (polutan) menjadi sulit didegradasi. Berikut ini beberapa faktor yang menjadikan senyawa organik stabil dan sulit terdegradasi:

- a. Berat molekulnya besar misalnya polimer-polimer
- b. Tingkat kelarutannya sangat rendah misalnya senyawa hidrokarbon minyak bumi atau Total Petroleum Hydrocarbon.
- c. Senyawa kompleks dan mengandung unsur halogen (F, Cl, Br, I). Senyawa ini sering pula disebut sebagai senyawa terhalogenasi. Senyawa yang selain terhalogenasi juga teramidasi, seperti senyawa Chloropropionamide.
- d. *Poor bioavailability*. Ini tidak terkait kepada sifat dari senyawanya, akan tetapi karena secara fisik tidak bisa terjangkau oleh mikroba. Sebagai contoh senyawa yang melekat erat kepada matrix tanah. Contoh lain adalah minyak yang menempel kepada tanah, dan tanah nya ini berukuran besar-besar partikelnya sehingga memerlukan pengadukan yang intensif atau memperkecil ukuran partikel tanah agar terjadi pencampuran antara substrat (senyawa minyak) dengan mikroba nya. Kondisi seperti ini disebut *poor bioavailability*.
- e. Kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan, seperti misalnya pH yang tidak sesuai, Temperature, adanya inhibitor, *nutrient* yang kurang.
- f. *Lack of degradatif enzyme*. Kondisi memang mikroba nya tidak mampu memproduksi enzyme spesifik yang diperlukan untuk membuat senyawa tersebut menjadi readily *biodegradable*.

Untuk menghadapi persoalan seperti di atas, maka teknik adaptasi, seleksi di laboratorium menjadi sangat penting untuk dikembangkan. Menambahkan substrat kedua dalam jumlah kecil umumnya dapat membantu proses adaptasi. Ada banyak cara atau strategi yang lain.

2 PENGENDALIAN PENCEMARAN LINGKUNGAN

2.1 Pembangunan yang Berkelanjutan

Sebagai negara yang sedang berkembang, berjumlah penduduk 275 juta jiwa dengan sumber daya alam berlimpah, Indonesia menjadi salah satu pusat perkembangan ekonomi di Asia. Kegiatan industri baik yang melibatkan penggunaan sumber daya alam Indonesia maupun yang tidak merupakan suatu keharusan sebagai penggerak perekonomian bangsa. Selain menjadi salah satu sumber pemasukan keuangan negara dan devisa, juga menjadi pencipta lapangan kerja bagi masyarakat. Kegiatan ini selain memberikan dampak positif bagi ekonomi, disisi lain tentu juga akan memberikan dampak lingkungan. Pembangunan yang tidak mempertimbangkan kelestarian sumber daya alam dan lingkungan diyakini akan berhenti suatu saat ketika sumber daya alam habis atau lingkungan rusak. Kondisi seperti ini harus dihindari karena akan membebani generasi yang akan datang. Oleh karena itu kegiatan pembangunan harus memperhatikan kelestarian sumber daya alam dan sejalan dengan kegiatan pengendalian dampak lingkungan. Terkait dengan pengendalian dampak lingkungan, upaya-upaya pencegahan dan pemulihan fungsi lingkungan hidup harus dilakukan bersama sama.

2.2 Peraturan Terkait Lingkungan

Undang Undang no 4 tahun 1982 tentang Ketentuan Ketentuan Pokok Lingkungan Hidup adalah undang undang yang pertama dibuat di Indonesia dengan maksud untuk melindungi lingkungan hidup. Peraturan ini diperbaharui oleh Undang-Undang no 23 tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup yang kemudian juga dicabut oleh Undang-undang no 32 tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang kemudian juga diperbaharui oleh Undang-Undang no 11 tahun 2020 tentang Cipta Kerja.

Sejak terbitnya undang undang pertama tentang lingkungan hidup tahun 2020, telah banyak peraturan dibawahnya baik berupa Peraturan Pemerintah (PP), Peraturan Menteri (Permen) dan Keputusan Menteri (Kepmen) tentang lingkungan, dibuat dan diberlakukan. Peraturan yang mengatur perlindungan terhadap lingkungan air adalah yang paling maju, kemudian disusul dengan

peraturan terkait pengelolaan pencemaran udara dan terakhir terkait dengan pengelolaan pencemaran lahan (tanah). Setelah terbitnya undang undang cipta kerja tahun 2020, peraturan terkait lingkungan mengacu kepada Peraturan Pemerintah (PP) no 22 tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Peraturan pemerintah ini mengatur semua aspek lingkungan hidup yang sebelum undang undang Cipta kerja terbit diatur oleh peraturan pemerintah sendiri sendiri. Hal terkait AMDAL, B3, lingkungan air, lingkungan udara, lahan (tanah), laut, semua ada di dalam PP no 21 tahun 2021.

2.3 Pencemaran Lingkungan

Pencemaran lingkungan sering diartikan sebagai suatu kondisi ketika komponen fisik dan biologis dari sistem bumi dan atmosfer mengalami gangguan yang mempengaruhi keseimbangan ekosistem. Pencemaran lingkungan berdasarkan UU no 23 tahun 1997 adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga kualitasnya turun ke tingkat tertentu yang menyebabkan lingkungan hidup tidak dapat berfungsi sesuai dengan peruntukannya. Pencemaran ini terjadi akibat pengelolaan lingkungan tidak dilaksanakan dengan baik sehingga limbah yang terbuang tidak terkelola atau terolah dengan baik (*poor in-house keeping*), pembuangan limbah yang tidak semestinya (*improper waste handling*), maupun akibat kecelakaan (*accidental spileage*).

Di Indonesia pencemaran lingkungan dapat juga terjadi akibat kegiatan melanggar hukum seperti *illegal tapping* (pencurian minyak dari pipa langsung, dan setelahnya lubang yang sengaja dibuat tidak ditutup sehingga menyebabkan masuknya minyak ke lingkungan tanah ataupun air).

2.4 Pengendalian Pencemaran Lingkungan

Pengendalian pencemaran dilakukan dengan pendekatan *begin of pipe* (hulu) dan *end of pipe approach* (hilir). Pengendalian di hulu lebih mengutamakan aspek aspek manajemen dari mulai minimalisasi penggunaan air, penggunaan bahan baku ramah lingkungan dan segregasi limbah. Pengendalian di hilir lebih mengutamakan teknologi pengolahan dan pemulihan. Prinsip pengelolaan dan pengendalian pencemaran lingkungan

adalah bagaimana limbah ditahan, direduksi, dan diolah sebelum dibuang ke lingkungan dan menjaga agar status lingkungan (air, udara, tanah) tidak berubah Bersama waktu, bahkan kalau bisa malah menjadi lebih baik. Sebagai contoh adalah kelas air. Jika saat ini suatu kelas badan air ditetapkan sebagai kelas A maka sampai kapan pun kelas badan air itu tetap kelas A. Jika saat ini suatu badan air ditetapkan sebagai kelas B maka sampai kapan pun kelas badan air itu tetap kelas B, bahkan kalau bisa naik menjadi kelas A. Jika suatu badan air turun ke;as dari A ke B, atau dari B ke C, maka artinya pengelolaan dan pengendalian lingkungan di tempat itu tidak berhasil. Pada kenyataannya banyak sumber sumber air yang di waktu lalu dipakai sebagai sumber air bersih untuk kebutuhan sanitasi, pada saat ini berubah menjadi air yang berfungsi menerima air limbah, bahkan dalam kurun waktu belum satu generasi. Hal ini memperlihatkan bahwa Upaya upaya pengendalian pencemaran lingkungan masih sangat rendah. Belajar dari negara-negara maju (sebagai contoh Jerman dan Korea Selatan) didalam melakukan pengendalian dan pengelolaan lingkungannya, terutama lingkungan badan air, seperti Sungai, ada dua prinsip diluar teknologi yang memegang peranan sangat penting. Kedua aspek tersebut adalah *fairness* dan *leadership*. Prinsip *fairness* (berkeadilan) adalah misalnya tidak hanya satu jenis sumber yang di perhatikan tapi seluruh sumber pencemar. Tidak hanya satu jenis industri yang diperhatikan tetapi seluruh jenis industri. Tidak hanya industri di satu daerah/kota yang dimonitor dan ditertibkan, tetapi industri diseluruh daerah/kota. Sering terlihat bahwa upaya-upaya pengendalian hanya fokus dibeberapa daerah dan dibeberapa lingkungan sungai saja. Industri sejenis di tempat lain tidak mendapat perhatian, sehingga aspek *fairness* tidak terpenuhi. Prinsip *leadership* adalah bagaimana pimpinan/kepala daerah menjadi panutan dalam Upaya pengendalian lingkungan hidup yang secara serius memimpin di depan upaya-uapaya penertiban. Jika pimpinan memberikan arahan maka semua pimpinan-pimpinan di bawahnya akan mengikuti dan melaksanakannya, apapun situasinya.

Dari aspek pencemar maka dapat dikelompokan sebagai pencemar adalah aktivitas industri, aktivitas domestik, aktivitas pertanian aktivitas pertambangan/perminyakan. Dari aspek lingkungan yang tercemar maka lingkungan air, udara, dan tanah yang menjadi korban. Melihat hal tersebut perkembangan teknologi pengolahan/pemulihan pencemaran air,

pencemaran udara dan pencemaran tanah yang semakin berkembang dari tahun ke tahun.

2.5 Teknologi Pengolahan/Pemulihan Lingkungan

Teknologi pengolahan air limbah adalah yang paling pertama dan banyak berkembang, digunakan untuk mengolah air limbah, terutama limbah industri. Hal ini sejalan dengan terbitnya peraturan terkait pengelolaan air limbah industri. Nampaknya ini sejalan dengan terbitnya banyak peraturan yang mengatur pengelolaan air limbah dari industri lebih dahulu dibandingkan dengan peraturan lain yang mengatur pencemaran udara dan pencemaran tanah. Di awal tahun 80an muncul program pemerintah yang dikenal dengan PROKASIH (Program Kali Bersih). Industri-industri kemudian banyak yang meng upgrade IPAL nya menjadi lebih lengkap dan benar. Sebelumnya banyak yang masih berupa kolam kolam penampungan saja. Menyusul kemudian teknologi pengelolaan limbah udara (air pollution) yang banyak diterapkan di tahun 90an menyusul program pemerintah yang disebut Langit Biru. Teknologi pemulihan tanah tercemar baru berkembang belakangan setelah munculnya Permen LH no 101 tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3 yang kemudian diganti dengan Permen KLHK no 101 tahun 2018 tentang Pedoman Pemulihan Lahan Tercemar B3.

Teknologi pengolahan air berbasis proses kimia dan fisika banyak diaplikasikan untuk mengolah air limbah industri yang mengandung senyawa senyawa kimia anorganik/logam berat dan kekeruhan. Teknologi berbasis proses biologi berupa kolam stabilisasi banyak diaplikasikan untuk mengolah air limbah domestik dan air limbah industri minyak kelapa sawit. Teknologi lumpur aktif (aerob) dan berbagai tipe pengolahan secara biologi yang anaerob juga banyak diterapkan untuk mengolah air limbah industri. Proses biologi didalam pengembangan teknologi pengolahan air sudah lebih maju dibanding kan dengan aplikasi untuk penanggulangan pencemaran tanah. Lumpur aktif sebagai contoh telah berkembang menjadi beragam modifikasinya. Demikian pula pengolahan air dengan proses biologi anaerob yang tidak membutuhkan oksigen, telah berkembang dan muncul produk-produk teknologi dengan berbagai nama.

Proses biologi untuk penerapan sebagai teknologi pemulihan lahan tercemar masih sangat terbatas. Pencemaran tanah banyak yang tidak

terberitakan oleh karenanya kurang mendapat perhatian dari pemerintah. Selain itu dampaknya tidak secara langsung terlihat. Berbeda dengan pencemaran air yang dapat langsung terlihat dan menyebar sepanjang wilayah badan air. Demikian juga dampak dari pencemaran udara dapat segera terukur dan dirasakan. Pencemaran tanah tidak nampak secara langsung. Pergerakan atau migrasi polutan di dalam tanah juga sangat terbatas. Jika pencemar sampai ke air tanah maka mulai lah pencemart tersebut mengancam pengguna air tanah atau sumur. Dampaknya tidak sekaligus, dapat terjadi berbulan bulan atau bahkan tahunan setelah pencemaran terjadi. Oleh karena itu perkembangan teknologi, ataupun penerapat teknologi pemulhan lahan tercemar khususnya yang menggunakan dasar proses biologi lebih lambat dibandingkan dengan teknologi teknologi pengolahan air limbah dan teknologi pengendalian polusi udara.

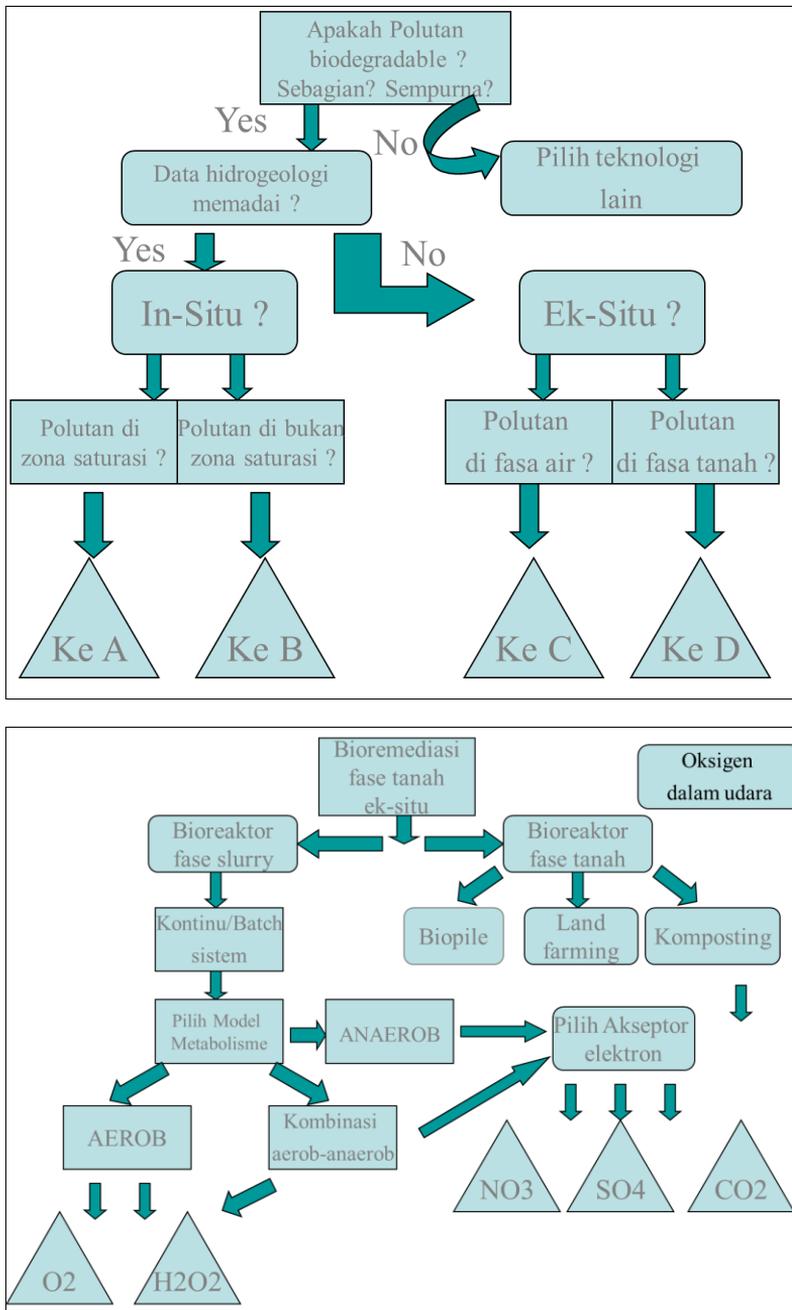
Dalam bagian berikut ini akan dibahas teknologi pemulihan lahan tercemar secara biologi.

3 PROSES BIOLOGI UNTUK PEMULIHAN LAHAN TERCEMAR

3.1 Studi Keterolahan (*Treatability Study*)

Study keterolahan atau *treatability* studi adalah kegiatan pertama dari proses perencanaan pemulihan lahan tercemar. Kegiatan dilaksanakan di laboratorium baik di dekat lokasi tanah tercemar atau pun di laboratorium umum di luar lokasi. Pada prinsipnya ini adalah pekerjaan laboratorium pada skala kecil. Studi ini dapat dilaksanakan atau dikerjakan berupa bench *scale* maupun lab *scale* jika ukurannya lebih besar tetapi masih bisa dikerjakan di dalam laboratorium, juga bisa dikerjakan pada skala pilot di luar laboratorium. Sampel tanah yang dipakai dalam percobaan ini adalah sampel tanah dari lapangan yang akan dipulihkan, sedangkan mikroba yang digunakan adalah mikroba yang akan diaplikasikan nanti pada skala penuh. *Treatability study* ini dilakukan untuk menjawab pertanyaan apakah zat pencemar di dalam tanah tersebut dapat terdegradasi secara biologi (*biodegradable*) atau tidak. Jika jawabannya ya maka proses biologi (atau *bioremediation*) dapat diaplikasikan, jika tidak maka harus dicari teknologi lain selain teknologi yang berbasis proses biologi. Pemilihan teknologi proses melalui kegiatan studi keterolahan pada umumnya akan memberikan alternatif teknologi yang lebih akurat. Walaupun ada pengeluaran tambahan untuk pekerjaan tambahan, namun secara keseluruhan akan cost-efektif mengingat kemungkinan keberhasilan proses jauh lebih tinggi dibandingkan dengan memilih secara langsung tanpa melalui studi keterolahan. Pekerjaan pemulihan tanah memerlukan perencanaan yang matang. Selain data-data fisik dari lokasi pencemaran seperti geologi permukaan, geologi tanah di area lokasi, hidrogeologi, kemudian informasi bagaimana pencemaran tanah tersebut bisa terjadi juga sangatlah penting. Semua informasi ini harus tertuang di dalam dokumen *Site Assesment Planning* (SAP). Kemudian teknologinya, metode-metode detail dari bagaimana pemulihan tersebut akan dilaksanakan, harus tertuang di dalam *Remediation Action Planning* (RAP). Dalam konteks peraturan terkait pemulihan lahan/tanah tercemar di Indonesia, kedua dokumen tersebut dijadikan satu menjadi satu dokumen yang disebut RPFLH (Rencana Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup).

Gambar berikut memperlihatkan *flowchart* bagaimana metode pemulihan lahan tercemar dilakukan.



Gambar 5. *Flowchart* diambil dari John T Cookson, 1995, dan diterjemahkan ke dalam Bahasa Indonesia.

Dari kedua *flowchart* di atas dapat dilihat bahwa teknologi yang berbasis proses biologi untuk pemulihan lahan tercemar (*bioremediation*) hanya untuk pencemar yang *biodegradable*. Teknologi atau metode lain (fisika atau kimia) harus dipilih jika pencemar tidak *biodegradable*.

Treatability skala kecil (*bench scale* dan *lab scale*) selain ditujukan untuk mendapatkan informasi tentang tingkat keterolahan suatu lahan tercemar, juga untuk mendapatkan parameter-parameter proses lain yang berguna untuk kepentingan desain maupun operasi dari teknologi ini. Salah satu contoh dari studi keterolahan adalah percobaan bioreaktor skala laboratorium yang mencoba melihat tingkat keterolahan satu jenis lumpur menggunakan konsorsium mikroba yang ada di laboratorium. Penelitian ini dikerjakan di Laboratorium Bioteknologi Lingkungan, PAU Biotek (sekarang menjadi Gedung Riset ITB). Sebagai reaktor biologinya adalah 4 kompartemen terbuat dari flexiglas yang dilengkapi dengan aerasi untuk suplai oksigen dari kompresor. Empat kompartemen tersebut dibuat untuk mensimulasikan kondisi di lapangan yang memiliki 4 kolam yang akan dipakai sebagai *slurry bioreactor*. Di dalam reaktor tersebut ditumbuhkan mikroba petrofilik dan sebagai substratnya adalah sludge yang mengandung Total Petroleum Hydrocarbon yang tinggi. Bakteri petrofilik yang sebagian diisolasi dari tanah tercemar di lokasi pencemaran kemudian ditumbuhkan dalam medium cair di 4 kompartemen di atas. *Oil sludge* kemudian ditambahkan ke dalam reaktor. Pengamatan dilakukan beberapa hari dengan melihat kekeruhan dari medium, ketebalan pertumbuhan bakteri di dalam reaktor kemudian perubahan secara fisik dari sludge yang ditambahkan ke dalam reaktor. Pertumbuhan bakteri petrofilik terlihat dari kekeruhan yang semakin bertambah juga suspended solid yang semakin terlihat. Wujud minyak dari *oil sludge* juga diamati dan mulai berubah. Sejalan dengan kemampuan dari bakteri yang mengeluarkan semacam *surfactant* (*biosurfactant*) sebagian minyak ini akan larut dan ini bisa terlihat minyak yang tadinya terpisah dari air akan mulai larut. Pada bagian akhir dari percobaan ini sampel diambil kemudian diperiksa *oil content*-nya. Profil dari hasil GC juga ditampilkan untuk melihat perbedaan antara sampel sebelum dan setelah diolah.

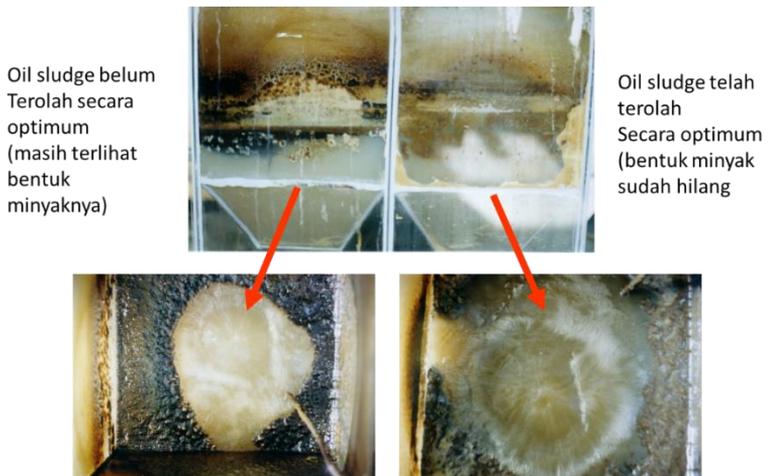
Bioreaktor Skala Labarotorium



Masing-masing reaktor berisi medium Cair dan biomass serta minyak/sludge Exspan. Reaktor di aerasi dengan Kompresor sebagai sumber udara.

(Percobaan ini me"mimik" kondisi pit Exspan tarakan jika di aerasi dan diberi biomass)

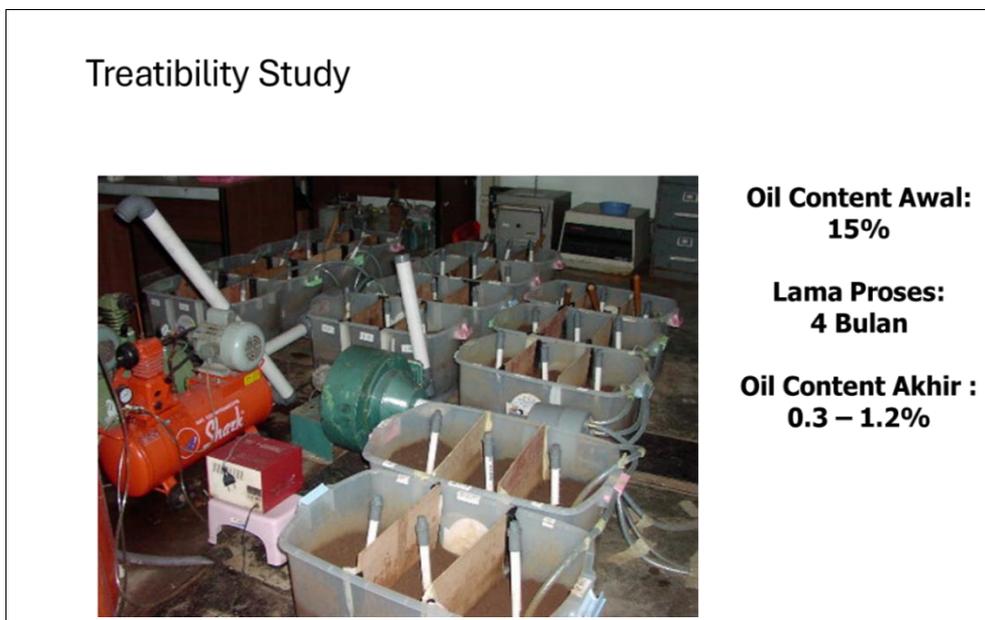
Perbandingan hasil pada reaktor dengan konsentrasi biomass berbeda



Gambar 6. Percobaan laboratorium slurry bioreactor (E. Kardena*)

Wujud *oil sludge* juga secara fisik juga berubah dari wujud yang seluruhnya berbentuk cair menjadi semacam lumpur tanah dengan bau minyak yang hampir hilang. Apabila proses tidak berjakan baik maka wujud *oil sludge* berada diantara wujud cair dan lumpur.

yang dibuat akan sebanyak variasi kondisi percobaan. Parameter yang di variasikan pada umumnya adalah parameter yang sering menjadi kunci keberhasilan misalnya konsentrasi awal pencemar, tingkat aerasi, ratio, C:N:P, pengaruh penambahan *bulking agent*, jenis sumber N dan P. Percobaan ini selain akan memberikan informasi mengenai tingkat keterolahan, juga akan memberikan informasi terkait kondisi percobaan yang memberikan hasil terbaik yang kemudian disarankan untuk menjadi pedoman pelaksanaan pada skala penuh di lapangan. Pada percobaan ini didapat hasil bahwa dari konsentrasi awal TPH 15%, proses biologi pada *Aerated Biopile* ini dapat menurunkan konsentrasi TPH sampai 0,3% dalam waktu 4 bulan.



Gambar 8. Percobaan *Aerated Biopile* skala laboratorium (E. Kardena*)

Pada saat percobaan dilakukan, peraturan yang berlaku adalah KepmenLH no 128 tahun 2003, dimana baku mutu untuk proses pengolahan oil sludge dengan bioremediasi adalah 1%.

Pada saat percobaan dilakukan, peraturan yang laboratorium, reaktor yang dipergunakan adalah seperti diperlihatkan pada Gambar 9. Perbedaan dengan *biopile* adalah dari cara bagaimana oksigen diberikan. Pada percobaan ini bukan dari kompresor, akan tetapi dilakukan dengan membolak-balik tanah di dalam Tray. Pada kenyataan di lapangan, tanah di area *landfarming*

diaduk-aduk (*tiling*) menggunakan alat berat pertanian (John Deer), atau dengan *backhoe*.

Treatability Test
Sampel with Parafinic characteristic



Initial Oil Content = 3 %
End of Oil Content = 0.2 – 0.4 %

Gambar 9. Percobaan skala laboratorium untuk aplikasi bioremediasi *ek-situ landfarming* (E. Kardena*)

Treatability study atau studi keterolahan ini umumnya dilaksanakan dalam 3 tahap. Tahap pertama adalah untuk mengetahui apakah zat pencemar ini bisa terdegradasi secara biologi. Tahap kedua adalah untuk mendapatkan kriteria desain untuk kepentingan aplikasi lapangan, sedangkan tahap ke tiga adalah untuk memperoleh parameter proses apabila skala pilot akan dilaksanakan sebelum skala penuh di lapangan (Kardena, et al, 2014)

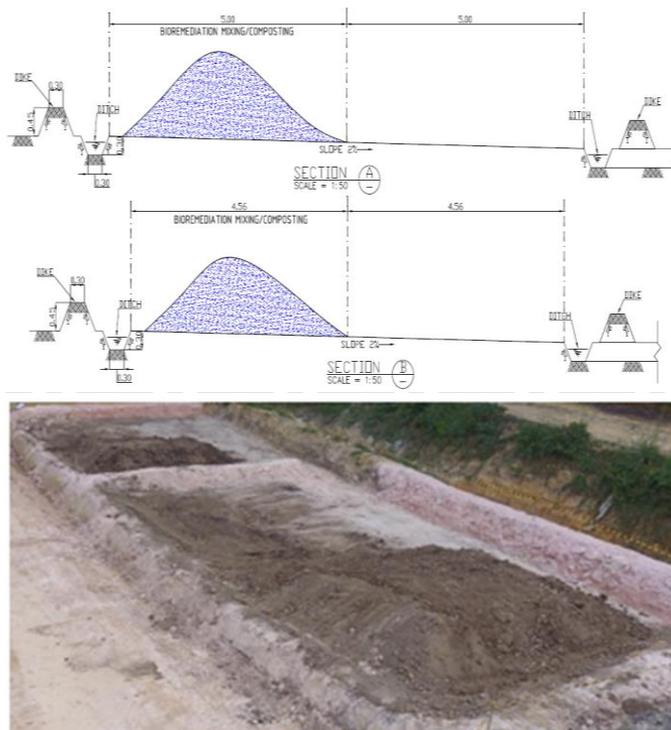
3.2 Pemulihan Lahan Tercemar pada Skala Pilot (*Pilot Scale*)

Apabila waktu dan biaya memungkinkan maka hasil *treatability study* atau percobaan skala kecil (*bench scale* dan *lab scale*) bisa dilanjutkan dengan percobaan pada skala yang lebih besar yaitu skala pilot. Percobaan skala pilot ini dikerjakan diluar laboratorium dengan menggunakan sampel tanah asli yang akan dipulihkan, dan juga dengan menggunakan mikroba yang nantinya akan digunakan di lapangan pada skala penuh. Akan lebih baik bila percobaan pada skala ini dikerjakan di lapangan yang berdekatan dengan lokasi tanah yang akan dipulihkan, sehingga material untuk percobaan dapat dengan mudah diperoleh dan semuanya dapat dipastikan adalah material yang akan dipergunakan pada pelaksanaan skala penuh. Percobaan pada skala ini sudah menggunakan hasil-hasil yang didapatkan pada percobaan skala yang lebih

kecil. Misalnya ratio C:N:P, sumber *nutrient* (N dan P), jenis *bulking agent*, ada atau tidak tambahan materi lain. Hasil dari percobaan pada skala pilot ini akan memberikan keyakinan yang lebih tinggi akan keberhasilan metode atau teknologi pada aplikasi skala penuh. Berikut ini contoh-contoh percobaan skala pilot.



Gambar 10. *Biopile* skala pilot di area Daop 2 PT KAI. Dokumentasi *workshop* bioremediasi, PAU Bioteknologi, 1997.



Gambar 11. Percobaan skala pilot *on-site bioremediation*. (E. Kardena*)

Untuk pelaksanaan percobaan skala pilot ini, gambar perencanaan dapat dibuat untuk melengkapi *Standard Operating Procedure* (SOP) yang khusus dibuat sebagai pegangan pelaksanaan percobaan. SOP ini dapat dikembangkan lebih lanjut dengan perbaikan-perbaikan dan detail seperlunya sesuai dengan hasil yang diperoleh dari percobaan pada skala ini.

3.3 Teknologi pemulihan tanah pada skala penuh

3.3.1 *Landfarming*

Landfarming adalah salah satu metode teknologi bioremediasi eksitu yang dikerjakan mirip dengan mengolah tanah pertanian. Cara memasukan oksigen kedalam tanah yang sedang dipulihkan adalah dengan melakukan *tiling* (mengaduk-ngaduk) menggunakan alat berat. Apabila akses alat berat tidak ada maka bisa menggunakan alat yang lebih kecil seperti *hand tractor*. Apabila pelaksanaan pemulihan tanah tercemar ini dilakukan di daerah remote di mana akses jalan sama sekali tidak ada, maka dapat dilakukan secara manual dengan mencangkul yang dilakukan oleh tenaga manusia secukupnya. Fungsi melakukan pengadukan (*tiling*) tersebut adalah untuk memasukan oksigen ke dalam tanah. Jika cara memasukan oksigen ke dalam tanah dengan memanfaatkan arah angin di lapangan dan pemaparan tanah di lokasi pengolahan diatur berlajur lajur mengikuti arah angin dominan di daerah tersebut, maka metode ini dikenal dengan nama *wind row*. Di dalam desain fasilitas bioremediasi jenis *landfarming* dan *wind row* ini ada persyaratan lokasi dan teknis yang harus dipenuhi. Diantara persyaratan tersebut adalah terkait dengan jarak lokasi ke pemukiman dan ke badan air, permeabilitas tanah, fasilitas pengatur tata air (tanggul) sehingga air hujan/limpasan dari luar lokasi tidak masuk ke area pengolahan dan sebaliknya air hujan yang jatuh di lokasi pengolahan tidak mengalir keluar. Secara prinsip keberadaan pengolahan tanah ini tidak boleh menjadi sumber pencemar baru bagi daerah sekitarnya. Secara rinci persyaratan-persyaratan teknis ini telah dituangkan kedalam peraturan yaitu PermenLHK no 6 tahun 2021 tentang Tata cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Beracun pasal 142 dan 143.

Karena metode ini umumnya memerlukan pergerakan alat alat berat yang cukup banyak misalnya *backhoe* untuk proses pengadukan, *dump truck* untuk

pengangkutan tanah tercemar dari lokasi pencemaran ke lokasi pengolahan lahan, maka di dalam desain tidak hanya direncanakan luas area pengolahan saja, tapi juga area pendukung seperti area pengumpulan tanah tercemar dan pengadukan, area pendukung seperti gudang bahan-bahan pendukung (sumber *nutrient*, mikroba) dan area dekontaminasi (*decontamination zone*). Area ini diperlukan untuk membersihkan alat transportasi pengangkut tanah tercemar ketika akan keluar dari lokasi pemulihan, sehingga tidak mencemari jalan yang dilalui oleh kendaraan tersebut. Dari sisi proses pun ada persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi misalnya tanah harus cukup memiliki pori-pori sehingga udara atau oksigen bisa mudah masuk. Oleh karena itu jika tekstur tanah tidak cukup baik, seperti tanah yang mengandung clay cukup tinggi (tanah lempung), maka harus dilakukan perbaikan tekstur tanah. Perbaikan tekstur tanah dilakukan dengan menambahkan *bulking agent* berupa bahan-bahan yang didapat dengan mudah di sekitar lokasi. Beberapa bahan yang bisa dijadikan *bulking agent* adalah selasah (potongan-potongan tanaman, semak, daun, rumput), bubuk gergaji, dan material sejenis. *Bulking agent* adalah material pertama yang ditambahkan ke dalam tumpukan tanah tercemar yang akan diolah, kemudian sumber N dan P yang biasanya diambil dari pupuk kimia (Urea, NPK, TSP). Mikroba ditambahkan paling terakhir untuk memulai proses bioremediasi ($T=0$).

Berikut ini adalah gambar-gambar contoh teknologi pemulihan tanah dengan *landfarming*.



Gambar 12. Teknik bioremediasi *wind row*. Foto adalah courtesy dari Dr. Mc NiClure (Flinders University).

Dengan kondisi cuaca sebagai negara tropis, pemilihan teknologi bioremediasi ek-situ jenis *landfarming* ini juga harus mempertimbangkan kondisi cuaca. Kelembaban akan sangat sulit di atur atau dipertahankan

terutama pada musim hujan. Tidak mungkin juga menutup seluruh area *landfarming* dengan penutup kedap air untuk mencegah air hujan masuk, karena terlalu luas. (Menutup dengan cara yang sama pada metode *biopile* masih dimungkinkan karena luasan nya yang jauh lebih kecil). Sebagai konsekuensi, pada saat musim hujan kandungan air dalam tanah yang sedang diolah akan menutup pori-pori dan menghambat masuknya oksigen ke dalam tanah. Oleh karena itu, selama musim hujan justru proses biologi akan terhambat sehingga waktu yang diperlukan untuk mengolah akan lebih lama. Konsekuensi lain adalah, operasi alat berat untuk mengaduk lagi setelah tanah menjadi kering akan harus lebih intensif.

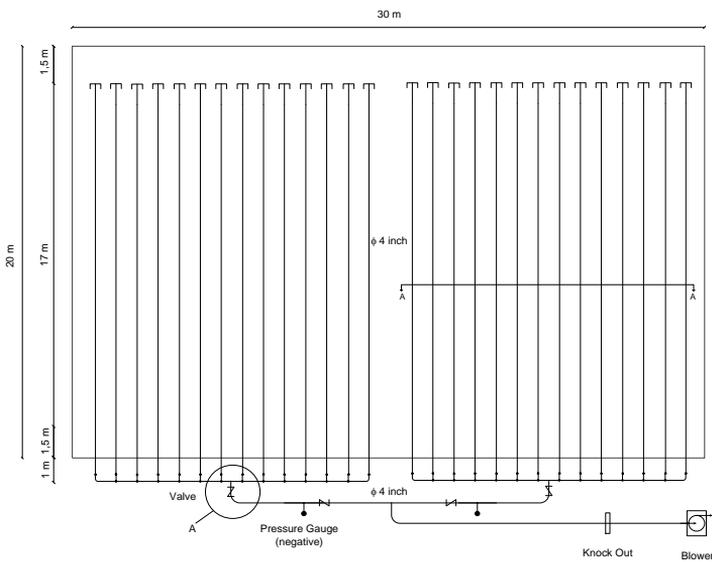


Gambar 13. Contoh aplikasi skala lapangan *landfarming* di Indonesia (E. Kardena*)

3.3.2 *Aerated Biopile*

Perbedaan antara metode *Aerated Biopile* dengan *landfarming* adalah dari cara memasukan oksigen ke dalam tanah yang sedang diolah. Apabila *landfarming* menggunakan alat berat dengan membolak-balikan tanah setinggi kurang lebih 30 cm di atas permukaan dasar fasilitas bioremediasi yang sudah dibuat kedap air, maka *Aerated Biopile* menggunakan kompresor ataupun *blower* dan sistem perpipaan yang dipasang di bagian dasar dari tumpukan tanah tercemar yang akan diolah. Penyiapan tanah tercemar yang akan diolah serta bahan-bahan yang dipergunakan sama dengan pada metode *landfarming*. Persyaratan desain teknis dari metode ini juga sudah dimasukkan ke dalam perturan yang sama yaitu PermenLHK no 6 tahun 2021 tentang Tata cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Beracun. Metode ini

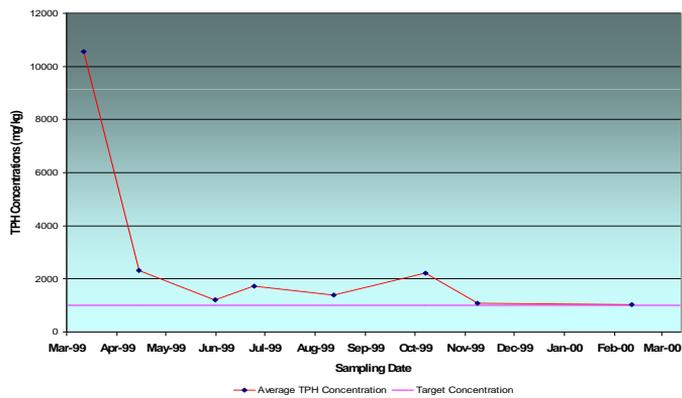
membutuhkan lahan yang jauh lebih kecil karena tumpukan tanah yang akan diolah bisa melebihi 1.5 meter. Bandingkan dengan metode *landfarming* yang hanya 30 cm. Jika akan dibandingkan maka metode *landfarming* akan memerlukan biaya lebih dipengadaan lahan, pengadaan alat berat serta operasinya. Selain pekerjaan sipil metode *Aerated Biopile* ini juga melibatkan pekerjaan mekanikal dan elektrik. Perpipaan untuk mengalirkan udara dari *blower* ke *biopile* (*positive pressure*) atau sebaliknya dari *biopile* ke arah *blower* (*negative pressure*), harus didesain sedemikian rupa sehingga aliran udara merata dan tidak ada kebocoran. Perhitungan ukuran *blower* dibuat dengan mempertimbangkan berat total carbon dalam senyawa pencemar, serta perkiraan lama proses bioremediasi. Dari sisi proses, kebutuhan *nutrient* (N dan P) dihitung berdasarkan rasio C:N:P sama dengan 100:10:1 atau sesuai dengan hasil percobaan laboratoriuun terkait ratio tersebut. Perbedaan lain dengan *landfarming*, pada *biopile*, dianjurkan untuk memiliki penutup dari bahan kedap air untuk melindungi pile pada saat hujan. Hal ini untuk menjaga kelembaban pile. Jika terlalu basah maka akan menutup pori pori tanah dan menghambat proses masuknya udara kedalam tanah. Pada metode *landfarming* penutup tidak diperlukan karena pada umumnya area pengolahan sangat luas sehingga menjadi tidak memungkinkan untuk ditutup. Sebagai penggantinya maka ketika hujan berhenti dan tanah mulai kering maka harus dilakukan *tiling* dengan alat berat untuk mengembalikan tekstur tanah. Berikut adalah beberapa contoh metode *biopile*.



Gambar 14. Desain perpipaan dasar *biopile* (E. Kardena*)



Gambar 15. Pelaksanaan pekerjaan kontruksi dasar *biopile* (E. Kardena*)



Gambar 16. Metode *biopile* dan hasil pengukuran penurunan pencemar selama proses berlangsung (Gambar dan grafik, courtesy dari Dr. Mc Niclure, Flinders University)

Aerated Biopile seperti yang dicontohkan pada Gambar 15, akan memerlukan pekerjaan konstruksi di awal yang lebih banyak. Pekerjaan mekanikal elektrikal terkait sistem pemasukan udara melalui *blower* dan perpipaan di dasar pile harus diselesaikan terlebih dahulu sebelum proses biologi dimulai. Namun apabila pekerjaan ini sudah selesai dilaksanakan, dan proses biologi (bioremediasi) sudah dimulai, maka selebihnya hanya pekerjaan monitoring proses dan pengambilan sampel saja. Pekerjaan yang melibatkan operasi alat berat selama proses tidak ada atau tidak diperlukan. Sehingga untuk membandingkan kedua metode bioremediasi ini (*landfarming* dan *biopile*) dari sisi biaya adalah selain aspek penyediaan lahan dan pekerjaan konstruksi diawal proses, kegiatan operasional selama proses menjadi aspek yang perlu dihitung dan akan memberikan perbedaan nyata. *Landfarming* akan lebih banyak mengeluarkan biaya untuk penyewaan atau penyediaan alat berat beserta biaya operasional alat berat, sedangkan pada *biopile* biaya listrik yang harus dihitung selama proses berlangsung.

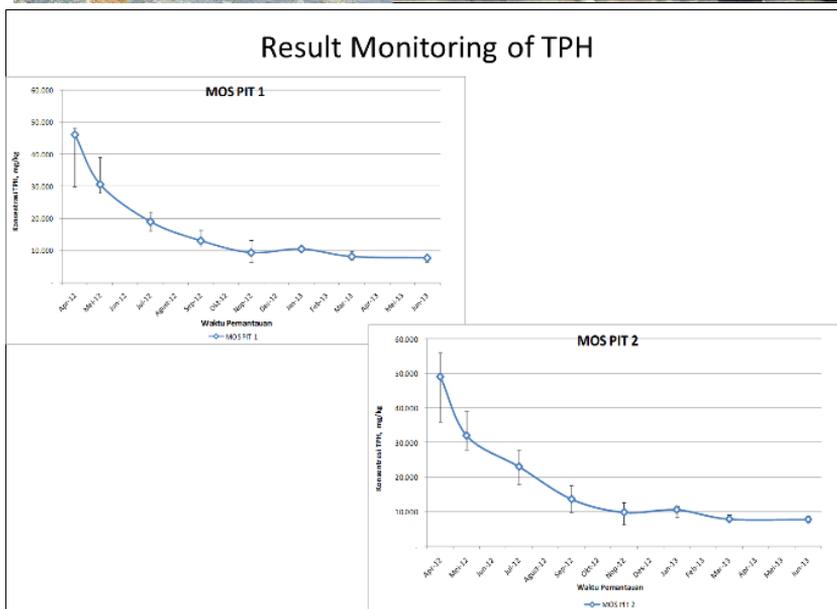
3.3.3 On-Site Bioremediation

On-site bioremediation adalah metode pemulihan lahan tercemar ek-situ. Pada dasarnya metode ini mirip dengan *biopile* namun tidak menggunakan alat mekanik (*blower*) untuk memasukan oksigen. Oksigen dimasukan kedalam tumpukan tanah tercemar yang sedang diolah dengan cara membolak-balikan tumpukan tanah dengan bantuan alat berat. Cara ini dikenal juga dengan *composting*. Aspek desain fasilitas atau lokasi pengolahan mengikut tatacara pengolahan lahan tercemar metode *biopile* dan *landfarming*. Perbedaan lain dengan dua metode sebelumnya adalah dari sisi jarak lokasi pengolahan dengan lokasi tanah tercemar. Lokasi pengolahan adalah di atas tanah tercemar yang digali. Oleh karena itu tidak ada persyaratan kontruksi dasar fasilitas pengolahan. Apabila tidak memungkinkan dilakukan di atas bekas lokasi tanah tercemar, maka lokasi pengolahan dapat digeser ke samping lokasi tanah tercemar. Jika lokasi tersebut teridentifikasi sebagai bukan termasuk tanah tercemar maka persyaratan teknis kontruksi dasar tetap harus dipenuhi. Persyaratan seperti yang tercantun pada PermeLHK no 6 tahun 2021 juga berlaku untuk metode ini. Salah satu kelebihan dari metode ini adalah tidak membutuhkan transportasi untuk mengangkut tanah tercemar ke lokasi pengolahan sehingga mengurangi biaya keseluruhan dari proses pengolahan. Kemudian, pada metode ini juga tidak diperlukan lahan lain

untuk mengumpulkan, mengaduk, maupun untuk membuang atau menempatkan tanah yang sudah diolah. Apabila lokasi pencemaran berada pada lokasi remote yang tidak memiliki akses untuk mobilisasi peralatan, maka penggunaan alat manual dengan tenaga manusia masih bisa dikerjakan. Penyiapan kontruksi dasar dari fasilitas atau tempat melakukan kegiatan bioremediasi ini juga untuk kasus *on-site bioremediation* tidak perlu dilakukan apabila lokasinya persis diatas lokasi tanah yang tercemar yang akan dipulihkan. Proses verifikasi oleh KLHK untuk melihat dan membuktikan keberhasilan kegiatan pemulihan nantinya akan menentukan apakah tanah dibawah proses pengolahan ini mengalami pencemaran atau tidak. Semua parameter penting yang diperiksa akan dibandingkan dengan baku mutu yang tertera pada Lampiran XIII PP no 22 tahun 2021. Pada Gambar 15 diperlihatkan kontruksi *on-site bioremediation* dan hasil *monitoring* penurunan TPH selama proses pemulihan berlangsung.

Metode ini adalah sebuah inovasi yang pada mulanya adalah metode *Aerated Biopile* yang dibalik dan dikerjakan dilokasi asal tanah tercemar yang berupa kolam. Metode ini dari sisi proses cukup berhasil, dapat menurunkan pencemar, dalam hal ini berupa Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) ke level yang sesuai dengan pada saat metode ini mulai dicoba yaitu Kepmen LH no 128 tahun 2003. Pada saat itu konsentrasi TPH pada tanah cukup tinggi (berupa *oil sludge*) sehingga baku mutu yang ditetapkan adalah 1% TPH. Pada saat ini dengan baku mutu yang lebih ketat untuk TPH rantai Panjang 1000 ppm dan rantai pendek 100 *oil sludge* ppm (Permen KLHK 101 tahun 2018), metode *on-site bioremediation* ini masih berhasil diterapkan, karena TPH awal yang diolah jauh lebih kecil dan tidak seperti *oil sludge*.

Berikut ini adalah beberapa contoh aplikasi lapangan pemulihan lahan tercemar menggunakan *on-site bioremediation*.



Gambar 17. Kontruksi liner dan perpipaan untuk *biopile* terbalik dan contoh monitoring penurunan TPH selama proses *on-site* bioremediasi. (E. Kardena*)



Gambar 18. Proses *on-site bioremediation*: pengadukan, penambahan *bulking agent*, pengadukan tahap operasional (E. Kardena*)

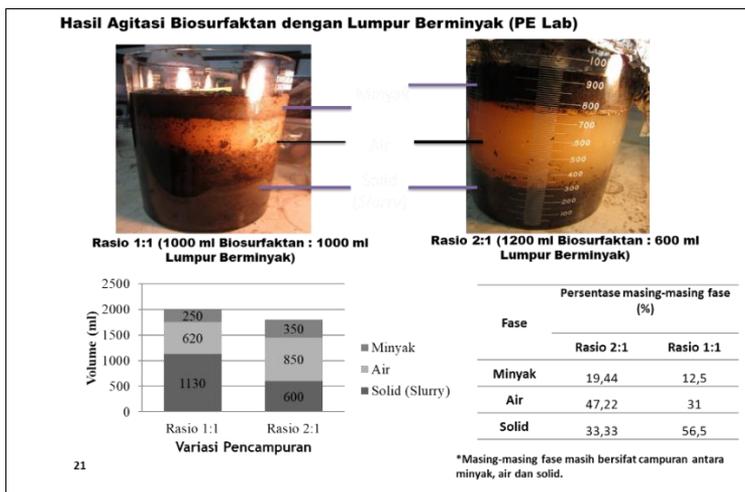
3.4 Peran *Biosurfactant* di Dalam Pemulihan Lahan Tercemar Minyak Bumi.

Minyak bumi memiliki kelarutan yang sangat rendah dalam air. Keterbatasan degradasi minyak bumi sebagai pencemar diduga akibat tingkat kelarutan yang rendah dan kemudian membatasi proses masuknya senyawa hidrokarbon minyak bumi ke dalam sel melalui membrane sel. *Surfactant* dikenal sebagai bahan yang menurunkan tegangan permukaan dan meningkatkan kelarutan suatu senyawa. *Biosurfactant* adalah *surfactant* yang dihasilkan oleh mikroba yang memiliki kemampuan khusus memproduksi bahan kimia yang berfungsi seperti *surfactant* kimia. Dari penelitian yang dilakukan, *ExoPolySaccharides* (EPS) dan *Fatty Acid* (FA/asam lemak) diketahui sebagai bahan aktif dari *biosurfactant* yang diproduksi oleh mikroba dari jenis *Azotobacter sp.* Bakteri jenis ini setelah tumbuh dalam medium cair yang didesain secara khusus akan menjadikan medium pertumbuhannya tersebut menjadi *crude biosurfactant*. *Crude biosurfactant* ini mengandung EPS dan FA yang dapat meningkatkan tingkat kelarutan hidrokarbon minyak bumi. Naiknya kelarutan minyak bumi berkorelasi positif dengan naiknya tingkat degradasi dari minyak tersebut. Pada umumnya bioremediasi minyak bumi dengan angka API yang rendah (minyak berat) akan lebih baik jika dibantu oleh *biosurfactant* ini. *Biosurfactant* ini juga telah berhasil membantu membersihkan batuan karang ditepi laut yang terkena imbas tumpahan minyak dilaut. Batu karang dibersihkan dengan mengaplikasikan *biosurfactant* yang disemprotkan dengan *high pressure nozzle*, yang dapat dikombinasikan dengan pengaturan temperature yang tinggi. Penambahan *biosurfactant* disarankan untuk mendegradasi minyak-minyak berat atau minyak dengan karakteristik tingkat kelarutan yang rendah (Jatnika et al,

2018). Penambahan bakteri petrofikik dan *biosurfactant* telah berhasil menaikkan tingkat degradasi minyak bumi pada aplikasi skala penuh bioremediasi (Qomarudin Helmy et al, 2015).



Gambar 19. Aplikasi *biosurfactant* pada pembersihan bata karang tercemar crude oil tumpahan minyak di pantai (E. Kardena*)

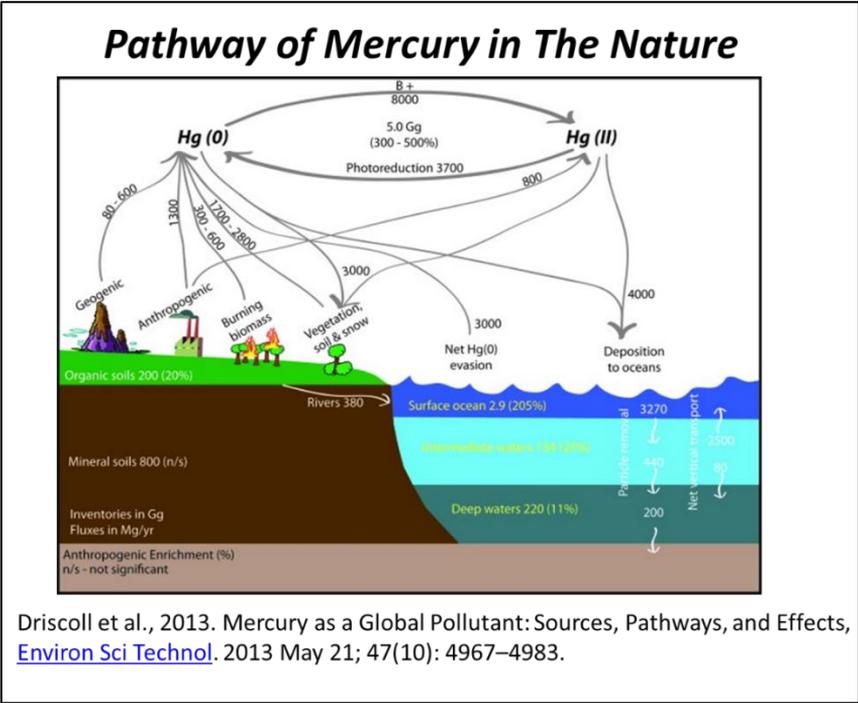


Gambar 20. Percobaan *recovery* minyak dari *sludge* atau tanah yang minyak berat (E. Kardena*)

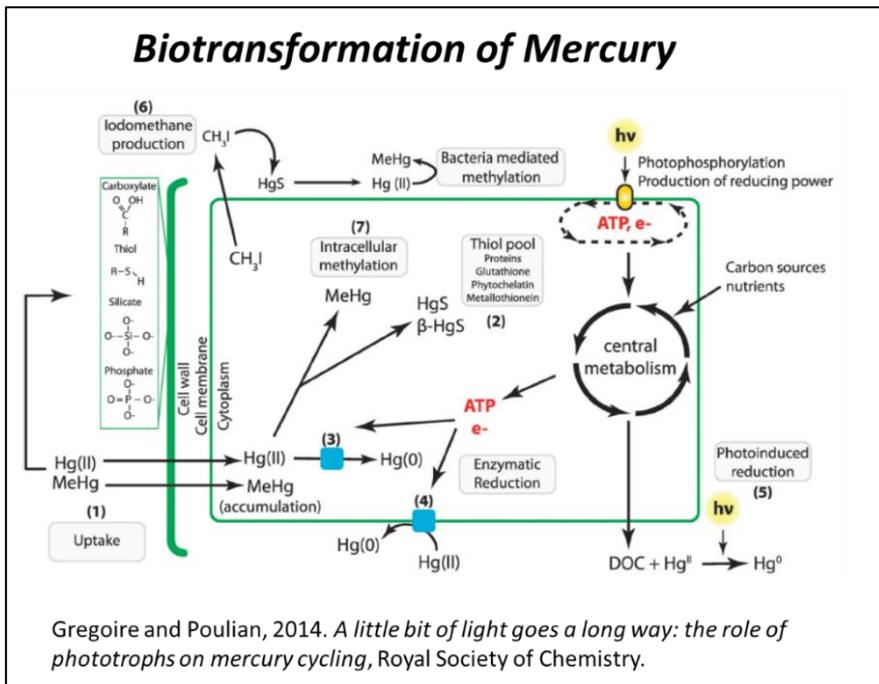
3.5 Proses Biologi untuk *Heavy Metal*

Pada umumnya proses biologi hanya diperuntukan untuk degradasi pencemar berupa senyawa organik. Namun walaupun demikian aktivitas mikroba dapat menyebabkan logam berat tertentu mengalami proses reduksi

atau oksidasi. Salah satu logam berat yang sering menjadi pencemar adalah merkuri. Merkuri dikenal sebagai logam berat yang menyebabkan Minamata Disease. Keberadaan merkuri di dalam air dan tanah banyak dikaitkan dengan aktivitas penambangan emas tanpa ijin (ASGM=Artisanal Gold Mining). Ekstraksi emas dari batuan dilakukan dengan menggunakan logam berat merkuri. Pada akhirnya merkuri banyak ditemukan diperairan maupun tanah disekitar penambangan dan pengolahan emas tanpa ijin. Merkuri di alam ada dalam bentuk Hg^{2+} dan juga Hg^0 . Keberadaan merkuri ini bisa akibat kegiatan manusia seperti yang dijelaskan di atas, dan ini dikenal juga sebagai sumber anthropogenic. Namun bisa juga secara natural karena factor geologi, dan ini dikenal juga sebagai sumber geogenic seperti diperlihatkan pada Gambar 19, transformasi Hg^{2+} menjadi Hg^0 terjadi didalam sel (mikroba). Methylated Merkuri dengan bantuan enzim reductase, diubah menjadi Hg^0 yang volatile dan akan keluar sel kemudian lepas ke udara (lihat Gambar 21) Di udara Hg^0 ini selanjutnya akan masuk ke siklus transformasi merkuri seperti yang diperlihatkan pada Gambar 22.



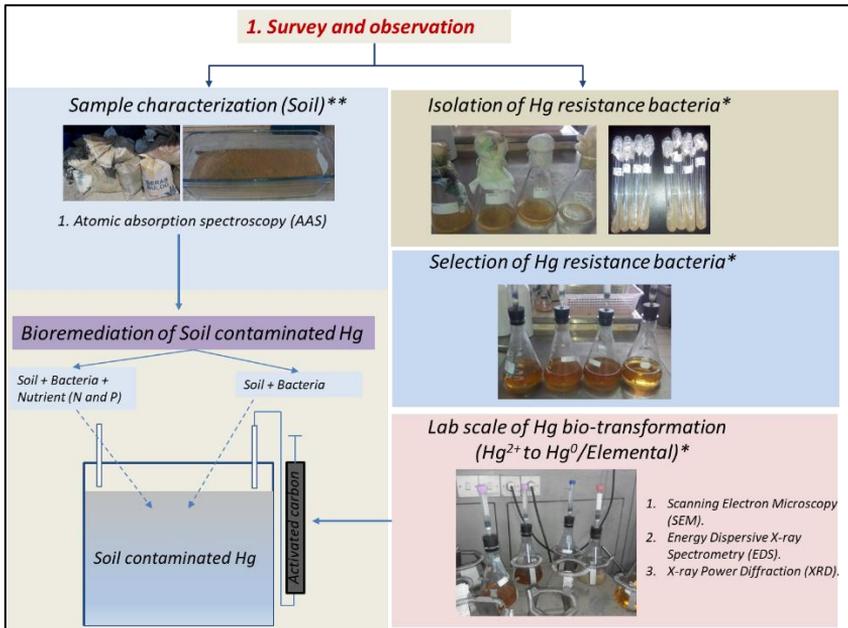
Gambar 21. Pathway merkuri di alam (Driscoll et al, 2013)



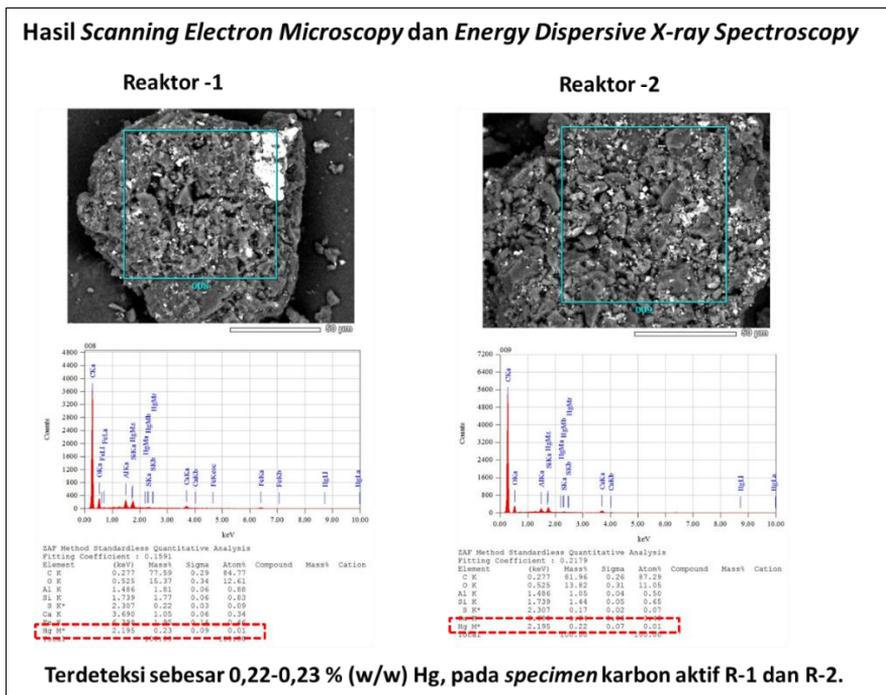
Gambar 22. Transformasi merkuri di dalam sel (Gregoire dan Poulian, 2014)

Isolasi bakteri dari sumber tanah tanah terkontaminasi merkuri telah berhasil mendapatkan beberapa spesies bakteri *indigenous* yang mampu mentransformasi merkuri seperti pada Gambar di atas. Percobaan skala laboratorium juga berhasil menangkap merkuri yang volatil dengan karbon aktif sehingga memungkinkan dikembangkan teknologi pemulihan khusus untuk tanah tercemar merkuri. Proses biologi anaerob akan mengubah Hg^{2+} menjadi Hg^0 , dan selanjutnya dengan menambahkan kolom karbon aktif, Hg^0 ini dapat di-*adsorp* untuk kemudian bisa di-*recovery* atau di solidifikasi.

Studi biotransformasi merkuri (II) oleh isolate bakteri dari beberapa lokasi penambangan emas tanpa ijin di Indonesia memperlihatkan bahwa kondisi anaerob diperlukan sebagai syarat dari reduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 . Tingginya konsentrasi merkuri tidak mematikan isolat bakteri, namun hanya waktu adaptasi dari bakteri yang menjadi lebih Panjang. (Kardena, et al, 2020).

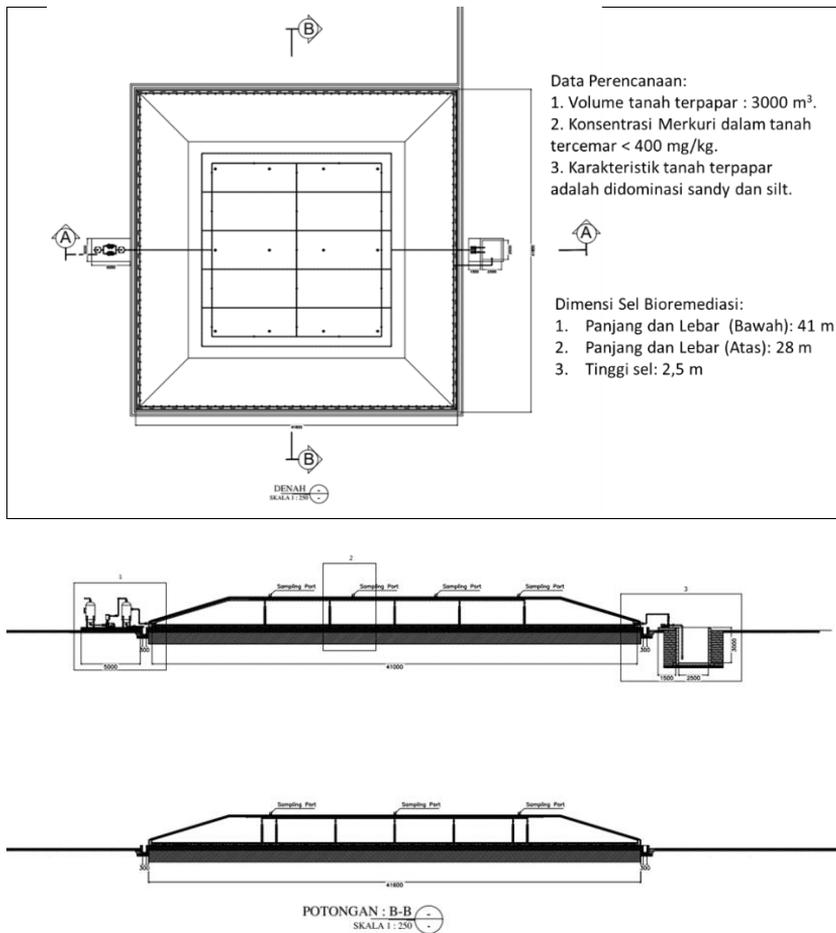


Gambar 23. Langkah-langkah percobaan untuk mendapatkan bakteri yang tahan terhadap merkuri dan aplikasi skala laboratorium remediasi lahan terkontaminasi merkuri secara biologi menggunakan bakteri tersebut.



Gambar 24. Hasil dari SEM dan EDX memperlihatkan keberadaan merkuri pada permukaan karbon aktif.

Keberhasilan percobaan skala laboratorium reduksi merkuri sekaligus menangkap merkuri yang lepas sebagai Hg⁰ dengan kolom karbon aktif telah membuka peluang aplikasi bioremediasi untuk tanah tercemar merkuri. Konsep desain fasilitas bioremediasi tersebut adalah seperti diperlihatkan pada gambar berikut.

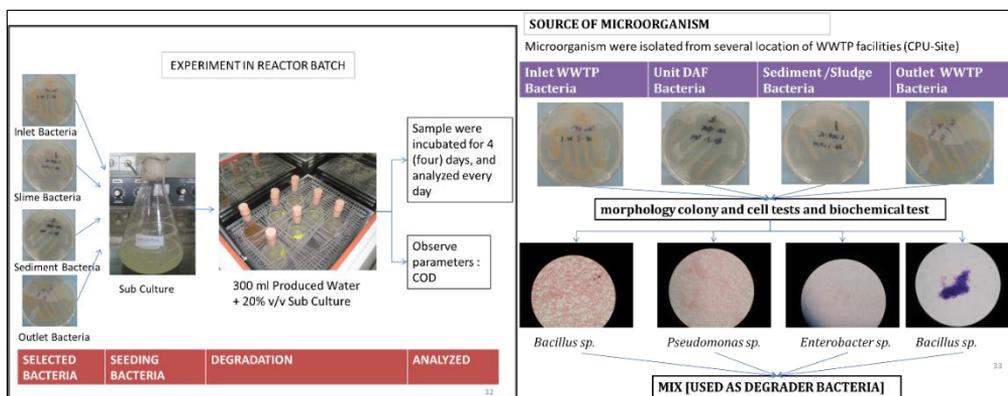


Gambar 25. Pra DED bioremediasi tanah terkontaminasi merkuri dengan capping anaerob dan dilengkapi dengan kolom karbon aktif untuk menangkap merkuri volatile (E. Kardena*)

4 MIKROBA PETROFILIK: DARI LAB KE APLIKASI LAPANGAN

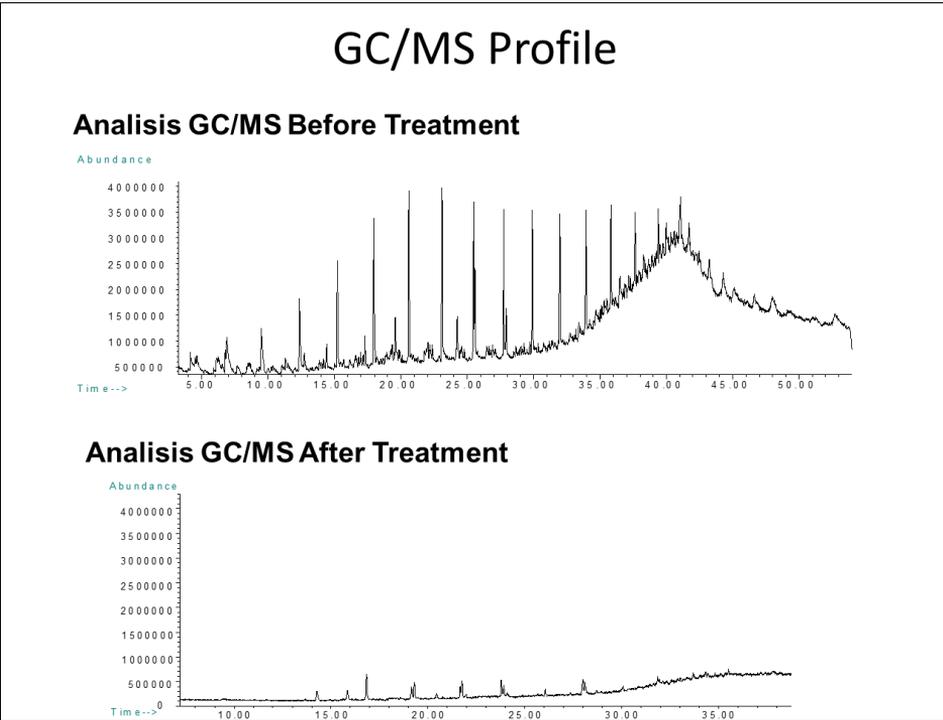
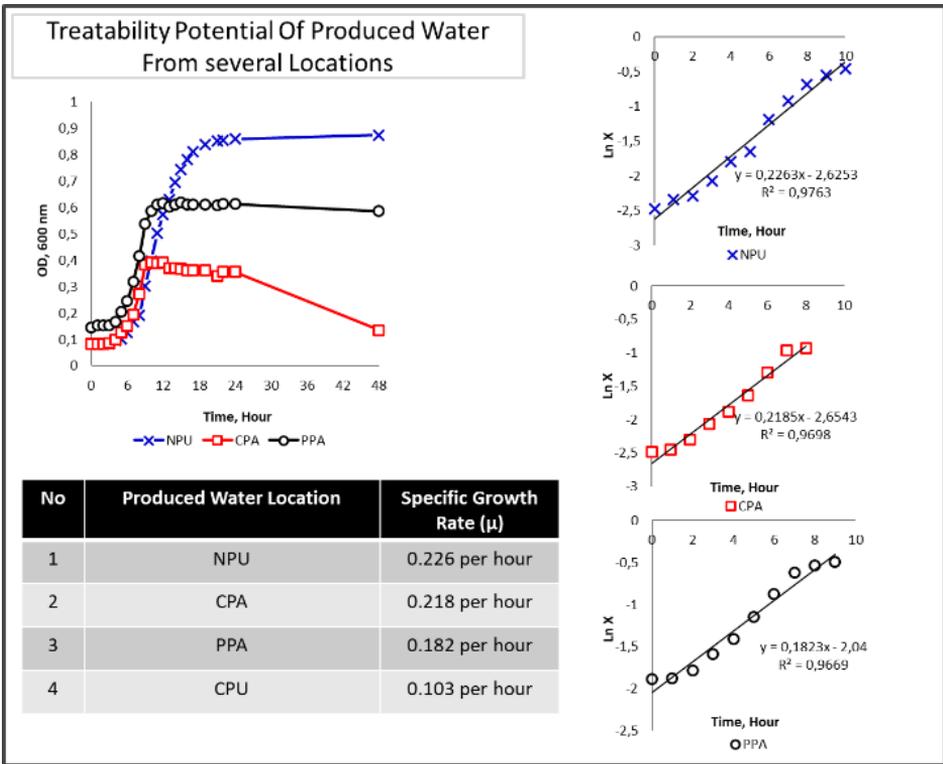
4.1 Isolasi, Seleksi dan Pengayaan

Proses isolasi, seleksi dan pengayaan dimulai dengan survey dan pengambilan sampel lingkungan berupa tanah dan air yang sudah lama berkontak atau tercemar oleh hidrokarbon minyak bumi. Umumnya sampel ini berasal dari daerah operasi Perusahaan minyak yang Sebagian besar ada di daerah pulau Sumatra dan Kalimantan. Peralatan, bahan sederhana berupa petridish yang sudah berisi agar dan dilumuri dengan substrat (*crude oil*, oli) serta spatula, cotton bud steril, kantong plastik ber penutup, spidol. Sampel tanah diambil dan dimasukkan kedalam kantong plastic lalu di sealed dan diberi catatan. Sampel tanah, air atau *sludge* juga secara langsung di swab menggunakan cotton bud kemudian di usapkan ke permukaan agar di dalam petridish. Sampel tersebut kemudian dibawa dan di inkubasi kan di laboratorium. Sampel tanah dimasukkan kedalam erlenmeyer berisi medium seleksi yang mengandung minyak bumi sebagai sumber karbon.



Gambar 26. Proses isolasi dan enrichment di laboratorium (E. Kardena*)

Setelah didapatkan kandidat unggulan bakteri petrophilic maka dilakukan seleksi dan karakterisasi untuk mendapatkan informasi lebih rinci dari kemampuan bakteri-bakteri tersebut dalam mendegradasi minyak bumi.



Gambar 27. Seleksi bakteri petrofilik unggul (E. Kardena*)

Bakteri unggulan adalah yang memiliki kemampuan tumbuh lebih cepat yang ditentukan dengan konstanta pertumbuhan spesifik yang besar, dan kemampuan untuk mendegradasi polutan pada konsentrasi yang kecil yang diperlihatkan dengan Konstanta Saturasi yang kecil. Pada Gambar 27. Diperlihatkan nilai nilai konstanta pertumbuhan spesifik dari bakteri yang diambil dari lokasi sampel yang berbeda beda. Hasil Analisis GS MS terhadap senyawa polutan sebelum dan setelah proses biologi juga diperlihatkan dan pada grafik bagian bawah jelas terlihat Sebagian besar peak telah menghilang. Hal ini mengindikasikan Sebagian besar dari TPH telah terdegradasi.

4.2 Penyiapan Produk

Pelaksanaan pemulihan lahan tercemar sering terjadi di daerah daerah yang relatif jauh, keterjangkauan transportasi yang tidak mudah. Untuk k mencapai lokasi harus menggunakan pesawat terbang dan transportasi darat yang cukup panjang. Dengan demikian akan memerlukan waktu yang lama juga untuk sampai ke lokasi. Hal ini menimbulkan tantangan sendiri untuk penyiapan produk dan transportasi sehingga mikroba yang akan dipergunakan bisa sampai di lokasi. Apabila memungkinkan semua kebutuhan bakteri ini disiapkan dari laboratorium, dan untuk memudahkan penanganan semua disiapkan dalam bentuk powder/solid ataupun dalam bentuk pasta. Penyiapan dalam bentuk cair akan menyulitkan transportasi. Apabila tidak memungkinkan semuanya dipersiapkan di laboratorium, maka hanya bibit nya saja yang disiapkan di laboratorium sedangkan pengayaan, atau penyiapan bakteri dalam bentuk cair dilaksanakan di lapangan. Sebagai konsekuensi maka di lapangan harus di desain dan dibangun tangki pengayaan bakteri. Selain bakteri yang disiapkan dalam bentuk cair maupun padat atau pasta, *biosurfactant* pun dipersiapkan dengan cara yang lebih efisien. *Biosurfactant* diketahui tidak bisa berkompetisi dengan yang berbasis sintesis kimia , salah satunya karena ongkos produksi yang mahal. Produksi *biosurfactant* dengan cara yang lebih efisien bisa membuat biaya lebih murah dan karakternya yang lebih ramah lingkungan menjadikan *biosurfactant* jenis ini lebih diminati. (Qomarudin Helmy et al, 2011)

Pada Gambar 28. Diperlihatkan bagaimana mikroba dipersiapkan di laboratorium dalam bentuk yang mudah untuk dibawa ke lapangan.

4.3 Aplikasi Lapangan

Untuk keperluan aplikasi lapangan, produk laboratorium yang dihasilkan dari proses biologi berupa bakteri pendegradasi hidrokarbon minyak bumi, dan *crude biosurfactant* yang mengandung EPS (*Exopolysacharide*) dan *Fatty Acid* (FA/*Asam lemak*) telah dikemas dalam bentuk yang memudahkan untuk penanganan dan transportasi.



Gambar 29. Penyiapan bakteri dalam bentuk powder (E. Kardena*)



Gambar 30. Pengeringan konsentrate bakteri dan *crude biosurfactant* (E. Kardena*)

5 PENUTUP

Rekayasa proses biologi menjadi penyambung antara mikrobiologi dan rekayasa serta telah membuka banyak alternatif inovasi teknologi khususnya dalam bidang teknologi lingkungan. Tidak terbatas untuk menyelesaikan persoalan pencemaran lingkungan perairan, juga untuk memulihkan tanah tercemar. Dimasa datang teknologi berdasarkan proses biologi ini juga sangat terbuka untuk memberikan alternatif bagi pengurangan pencemaran di udara. Luasnya keaneka ragaman mikroba dengan karakter-karakternya yang spesifik, juga berkembangnya teknik atau metode seleksi, metode aklimatisasi (adaptasi) juga memperlihatkan bahwa penelitian-penelitian serta pengembangan inovasi teknologi lingkungan berdasarkan proses biologi masih sangat terbuka. Makalah ini lebih banyak menyajikan informasi di hilir dari riset dang pengembangan bidang rekayasa proses biologi khususnya yang terkait dengan reduksi polutan, pemulihan lahan tercemar senyawa organik. Penelitian yang lebih ke arah hulu juga sangat terbuka dan akan sangat membantu pengembangan keilmuan serta inovasi yang akan memberikan alternatif pemecahan masalah masalah lingkungan secara umum untuk keberlanjutan pembangunan ekonomi bangsa.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada guru-guru penulis dimasa masa awal karir sebagai peneliti dan dosen muda di Teknik Lingkungan. Prof Dr. Ir. Wisjnuprpto (purna bakti), Prof. Dr. Benny Chatib (alm). Prof. Oei Ban Liang (alm). Kemudian kepada Dr. Ir. Endang Setiawati Angkasa (Mbak Ti) yang telah banyak memberikan kesempatan berpraktek, mempelajari persoalan persoalan lingkungan khususnya bidang air limbah di wilayah DKI Jaya. Kolega-kolega di ITB yang senantiasa memberikan dukungan terhadap kegiatan riset dan pengajaran, Prof. Dr. Mindriany Syafila, Prof. Prayatni Soewondo, Prof. Suprihanto Notodarmojo, Prof. Agus jatnika Efendi. Terima kasih juga kepada ibu Dr. Haruki Agustina dan Dra Melda Mardalina MSc, yang telah memberikan kesempatan untuk bisa berdiskusi, melihat ke lapangan kegiatan-kegiatan pemulihan lingkungan hidup di berbagai lokasi di Indonesia. Juga kepada Prof Agus M Ramdhan (FITB) yang telah berkenan memberikan review kepada makalah ini. Kolega riset bidang bioproses, Dr. Qomarudin Helmy, Dr. Sri Harjati Suhardi (SITH), Dr. Syarif Hidayat. Para mahasiswa bimbingan S3, S2, S1, baik yang telah lulus maupun yang masih berjuang untuk menyelesaikan studinya. Juga kepada para teknisi yang telah membantu pekerjaan pekerjaan laboratorium, Pak Eka, Pak Isur, Pak Yodi Ilyas (alm).

Semoga amal baik mereka menjadi amal baik dan diberikan balasan yang berlipat ganda oleh Tuhan Yang Maha Esa.

DAFTAR PUSTAKA

- Syeda Ulfath Tazeen Kadri**, Adinath N. Tavanappanavar, R. Nagesh Babu, Muhammad Bilal, Bhaskar Singh, Sanjay Kumar Gupta, Ram Naresh Bharagava, Muthusamy Govarthanan, Mohammed Azharuddin Savanur & Sikandar I. Mulla, *Overview of Waste Stabilization Ponds in Developing Countries in Cost-Efficient Wastewater Treatment Technology*, 2021, pp 153-175.
- John T Cookson**, *Bioremediation Engineering: Design and Application*. Mc Graw-Hill Education, 1995.
- Edwan Kardena**, Qomarudin Helmy and Naoyuki Funamizu. *Biosurfactant and Soil Bioremediation in Biosurfactant: Production and Utilization-Process, Technologies and Economics*, Edited by Naim Kosaric and Fazilet Vardar-Sukan. CRC Press, Taylor and Francis Group, 2014.
- Agus Jatnika Efendi**, Edwan Kardena and Qomarudin Helmy. *Biosurfactant-enhanced Petroleum Oil Bioremediation*, in *Microbial Action on Hydrocarbon*, edited by Vivek Kumar, Manoj Kumar, and Ram Prasad, Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018.
- Edwan Kardena**, Yos Panha, Qomarudin Helmy and Syarif Hidayat, *Application of mercury resistant bacteria isolated from Artisanal Small Scale Gold mining tiling in biotransformation of Mercury (II) – contaminated soil*, *International Journal of GEOMATE*, 2020.
- Qomarudin Helmy**, Edwan Kardena, Naoyuki Funamizu, Wisjnuaprpto, *Strategies toward commercial scale of biosurfactant production as potential substitute for its chemically counterparts*. *Int. J. Biotechnology*, Vol 12, 2011.
- Qomarudin Helmy**, Rudy Laksmono and Edwan Kardena, *Bioremediation of aged contaminated soil: From laboratory scale to full scale applications*. *Procedia Chemistry*, Elsevier, 2015.
- E. Kardena***. *Gambar/foto koleksi dari kegiatan pengabdian Masyarakat E. Kardena melalui LAPI dan LPPM dari kurun waktu 2000-2021*.

Foto/Gambar dari Dr. Mc Niclure (late) Adelaide University, Australia. 2000.
(Dr. Mc Niclure adalah kolaborator dari E. Kardena untuk topik bioremediasi).

CURRICULUM VITAE



Nama : Edwan Kardena
Tempat/tgl lahir : Garut, 9 Desember 1962
Kel. Keahlian : Rekayasa Air dan Limbah Cair
Alamat Kantor : Jln. Ganesha no 10
Nama Istri : Inten Cahyawulan

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

| No. | Jenjang Pendidikan | Perguruan Tinggi | Tahun Lulus | Gelar | Bidang |
|-----|--------------------|---|-------------|-------|---|
| 1. | S1 | ITB | 1988 | Ir | Teknik Lingkungan |
| 2. | S2 | - | | | |
| 3. | S3 | University of Wales. College of Cardiff Inggris | 1995 | Ph.D | Environmental Microbiology/Biotechnology |

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

| No. | Nama Jabatan | Tahun | Keterangan |
|-----|--|-------------|---|
| 1. | Direktur Kemitraan dan Hubungan Internasional ITB periode 2012-2014 | 2012 - 2014 | SK Rektor ITB No. 037/SK/I1.A/OT/ 2012, tgl, 18 Februari 2012 |
| 2. | Direktur Kemitraan dan Hubungan Internasional ITB periode 2014-2015 | 2015 | SK Rektor ITB No. 075/SK/I1.A/KP/ 2014, tgl, 28 Februari 2014 |
| 3. | Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan ITB Periode Tahun 2020 - 2024 | 2020 - 2024 | SK Rektor ITB No. 212/IT1.A/SK/KP/2020, tgl, 18 Mei 2020 |

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

| No. | Pangkat | Golongan | TMT |
|-----|------------------|----------|------------|
| 1. | Penata Muda | III/a | 01/10/1990 |
| 2. | Penata Muda TK I | III/b | 01/10/1997 |
| 3. | Penata | III/c | 01/10/2000 |
| 4. | Penata TK I | III/d | 01/04/2004 |
| 5. | Pembina | IV/a | 01/04/2007 |

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

| No. | Nama Jabatan | TMT |
|-----|--------------------|------------|
| 1. | Asisten Ahli Madya | 01/07/1992 |
| 2. | Asisten Ahli | 01/06/1997 |
| 3. | Lektor Muda | 01/07/2000 |
| 4. | Lektor | 01/01/2001 |
| 5. | Lektor Kepala | 01/04/2004 |
| 6. | Guru Besar | 01/06/2023 |

V. KEGIATAN PENELITIAN

| No. | Peneliti, Judul Penelitian | Sumber dana; Tahun; Tempat publikasi |
|-----|---|--|
| 1 | Edwan Kardena & Agus Jatnika Effendi. Evaluasi Teknis Sistem Pencampuran Dan Aerasi Pada Penggunaan Enzim Pendegradasi Senyawa Azo Untuk Penghilangan Warna Limbah Cair Industri Batik | Tahun 2014. Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi - Ristekdikti |
| 2 | Edwan Kardena & Agus Jatnika Effendi. Pengembangan Metoda Uji Cepat Sifat Biodegradasi untuk Berbagai Pewarna Azo | Tahun 2016. Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi - Ristekdikti |
| 3 | Edwan Kardena & Agus Jatnika Effendi. Pengembangan Reaktor Unggun Tetap Berbasis Mycotreatment untuk Penghilang Warna Limbah Cair Industri | Tahun 2016. Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi - Ristekdikti |
| 4 | Agus Jatnika Effendi & Edwan Kardena. Penggunaan Lakase Untuk Meningkatkan Rendemen Pada Proses Enzyme Enhanced Oil Recovery (EEOR) | Tahun 2018. Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi - Ristekdikti |
| 5 | Edwan Kardena. "Biodispersant For Oil Contamination Remediation" | Tahun 2020 Riset P3MI - ITB |
| 6 | Edwan Kardena ., Qomarudin Helmy., Dadi Surachman "Pengembangan bio-based sorbent dalam penanggulangan tumpahan minyak bumi di perairan laut" | Tahun 2021 Riset P2MI – ITB |
| 7 | Edwan Kardena ., Qomarudin Helmy., "Mikroba Aktif dalam Bioleaching dan Potensi Aplikasinya dalam Menurunkan Konsentrasi Logam Berat dari Abu Batu Bara" | Tahun 2022 Riset P2MI – ITB |

VI. PUBLIKASI

I. Penulisan buku teks/diktat (*disusunurut berdasarkan tahun penerbitan*)

| No. | Pengarang; Judul | Tempat dan tahun publikasi | Penerbit |
|-----|---|----------------------------|---|
| 1 | Edwan Kardena , Qomarudin Helmy, and Naoyuki Funamizu, "Biosurfactants and Soil Bioremediation", in Book Chapter Biosurfactants: pp. 327-360, https://doi.org/10.1201/b17599-19 https://www.researchgate.net/publication/290122590_Biosurfactants_and_Soil_Bioremediation | Perancis, 2014 | Production and Utilization - Processes, Technologies, and Economics, Surfactant Science Series Volume 59, PCRC Press Taylor and Francis Group, 2014, ISBN 978-1-4665-9669-6 |
| 2 | Agus Jatnika Effendi, Edwan Kardena , Qomarudin Helmy., "Biosurfactant-Enhanced Petroleum Oil Bioremediation", a book chapter dalam buku "Microbial Action on Hydrocarbons, https://doi.org/10.1007/978-981-13-1840-5 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-1840-5-7 | Singapore, 2018 | Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018, ISBN: 798-91-13-1839-9 http://doi.org/10.1007/978-981-13-1840-5 |
| 3 | Qomarudin Helmy, Edwan Kardena and Sri Gustiani, "Probiotics and Bioremediation", https://doi.org/10.5772/intechopen.90093 https://www.intechopen.com/chapters/70338 | London, 2019 | In book: Microorganism, Intech Open, edited by Dr. Miroslav Blumenberg, ISBN 978-1-83880-188-5 |
| 4 | Rudy Laksmono Widajatno, Edwan Kardena , Nur Novilina Arifianingsih, and Qomarudin Helmy, "Activated Sludge: Conventional Dye Treatment Technique", Biological Approaches in Dye-Containing Wastewater https://doi.org/10.1007/978-981-19-0545-2_5 | Singapore, 2022 | Springer , 1st ed. 2022 edition (March 31, 2022, pp. 119 - 153, ISBN-10 : 9811905444 ; ISBN-13 978-9811905445: |
| 5 | Edwan Kardena , Qomarudin Helmy, Sukandar, "Biosurfactant in Oil Spill Cleanup", Marine Surfactants, 1st ed. Dec 2022, pp. 327-374, ISBN 9781003307464 https://doi.org/10.1201/9781003307464 https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003307464-15/biosurfactants-oil-spill-cleanup-kardena-helmy-sukandar | Boca Raton, Perancis 2022 | Taylor & Francis Group, 1st ed. Dec 2022, pp. 327-374, ISBN 9781003307464 |

Dalam jurnal internasional ber-*referee* dan diakui

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun; ISSN; Tempat publikasi |
|-----|---|---|
| 1 | Estevanus Kristian Huliselan., Satria Bijaksana., Wahyu Srigutomo., Edwan Kardena , "Scanning electron microscopy and magnetic characterization of iron oxides in solid waste landfill leachate" | Journal of Hazardous Materials, Volume 179, Issues 1–3, 15 July 2010, Pages 701-708, ISSN 0304-3894 https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.058 |
| 2 | Herto Dwi Ariesyady, Rifka Fadilah, Kurniasih, Aminudin Sulaeman, and Edwan Kardena , "The Distribution of Microalgae in a Stabilization Pond System of a Domestic Wastewater Treatment Plant in a Tropical Environment (Case Study: Bojongsong Wastewater Treatment Plant)" | Journal of Engineering and Technological Sciences Vol. 48, No.1, 2016, pp. 86-98 , ISSN 2337-5779 https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2016.48.1.7 https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/2357 |
| 3 | Suprihanto Notodarmojo., Doni Sugiyana, Marisa Handajani., Edwan Kardena ., Amanda Larasati, "Synthesis of TiO2 Nanofiber-Nanoparticle Composite Catalyst and Its Photocatalytic Decolorization Performance of Reactive Black 5 Dye from Aqueous Solution" | Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 49, No. 3 (2017), Page. 340-356, ISSN 2337-5779 https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.3.4 https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/3526 |
| 4 | Edwan Kardena ., Yos Panha., Qomarudin Helmy., Syarif Hidayat, "Application Of Mercury Resistant Bacteria Isolated From Artisanal Small-Scale Gold Tailings In Biotransformation Of Mercury (Ii) – Contaminated Soil", | International Journal of GEOMATE, July, 2020, Vol.19, Issue 71, pp. 106 – 114, Japan, Geotechnique, Construction Materials and Environment, ISSN: 2186-2982 (P), 2186-2990 (O), https://doi.org/10.21660/2020.71.68786 https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85086780612&origin=resultslist&sort=plf-f&featureToggles=FEATURE_NEW_DOC_DETAILS_EXPORT:1,FEATURE_EXPORT_REDESIGN:0 |
| 5 | Kardena, E. , Pratama, A.N.K., Suhardi, S.H., Hasan, K., Effendi A, "Decolorisation Of Batik Waste Water By Marasmiellus Palmivorus Using Modified Fixed Bed Reactor" | Malaysian Applied Biology Volume 49, Issue 2, July 2020, Page. 55-61, ISSN. 0126-8643 https://doi.org/10.55230/mabjournal.v49i2.1523 https://jms.mabjournal.com/index.php/mab/article/view/1523 |
| 6 | Qomarudin Helmy, Edwan Kardena , Zeily Nurachmand and Wisjnuaprpto, "Application of Biosurfactant Produced by Azotobacter Vinelandii AV01 for Enhanced Oil Recovery and Biodegradation of Oil Sludge" | International Journal Civil and Environmental Engineering IJCEE-IJENS, Vol. 10 No. 01, February 2010, ISSN: 2010-0264 (Print) https://ijens.org/107501-0606%20IJCEE-IJENS.pdf |
| 7 | Qomarudin Helmy, Edwan Kardena , Naoyuki Funamizu, and Wisjnuaprpto, "Strategies Toward Commercial Scale of Biosurfactant Production as Potential Substitute for it's Chemically Counterparts" | International Journal of Biotechnology, Volume 12, Issue 1-2 ,2011, pISSN 09 63-6048, oISSN 1741-5020, https://doi.org/10.1504/IJBT.2011.042682 https://www.inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJBT.2011.042682 |
| 8 | Astri Rinanti, Edwan Kardena , Dea Indriani Astuti, and Kania Dewi, "Improvement of Carbon Dioxide Removal Through Artificial Light Intensity and Temperature by Constructed Green Microalgae Consortium in a Vertical Bubble Column Photobioreactor" | Malaysian Journal of Microbiology, Vol. 10(1) 2014, pp. 29-37, ISSN 1823-8262, http://dx.doi.org/10.21161/mjm.56713 http://mjm.usm.my/uploads/issues/342/Corrected%20Proof%20MJM%20567-13.pdf |
| 9 | Astri Rinanti, Edwan Kardena, Dea Indriani Astuti, and Kania Dewi, "Biotechnology Carbon Capture and Storage (CCS) by Mix-culture Green Microalgeto Enhancing CO2 Uptake Rateand CO2 Removal Efficiency with Different Aeration Rates in Closed System Photobioreactor" | Jurnal Teknologi-UTM, Malaysia, Vol. 69, No. 6 October 2014 pp. 105-109, ISSN. 2180-3722 https://doi.org/10.11113/jt.v69.3317 https://journals.utm.my/jurnalteknologi/article/view/3317/2469 |

I. Dalam jurnal nasional terakreditasi

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol tahun; ISSN; No. akreditasi; Tanggal, dan peringkat akreditasi |
|-----|---|---|
| 1. | Opy Kurniasari, Tri Padmi, Edwan Kardena , Enri Damanhuri, "Performa Oksidasi Metan pada Reaktor Kontinyu dengan Peningkatan Ketebalan Lapisan Biocover Landfill", | Reaktor, Vol. 14 No. 3, April 2013, hlm. 179-186. Jurnal Terakreditasi No. 66b/ DIKTI/Kep/2011 ; ; p-ISSN 0852-0798 ; e-ISSN 2407-5973 https://doi.org/10.14710/reaktor.14.3.179-186 https://ejournal.undip.ac.id/index.php/reaktor/issue/view/1180 |
| 2. | Djaenudin, Mindriany Syafila, Edwan Kardena , dan Isdiriyani Nurdin, "Pengaruh Jenis Anoda pada Proses Pemulihan Logam Nikel dari Tiruan Air Limbah Electroplating Menggunakan Sel Elektrodeposisi", | Reaktor, Vol. 14 No. 3, April 2013, hlm. 211-217. Jurnal Terakreditasi No. 66b/DIKTI/Kep/2011 ; p-ISSN 0852-0798 ; e-ISSN 2407-5973 https://doi.org/10.14710/reaktor.14.3.211-217 https://ejournal.undip.ac.id/index.php/reaktor/issue/view/1180 |
| 3. | Lely Fitriyani, Edwan Kardena , and Sukandar Sukandar, "Solid Concentration Effect for Solvent Extraction Process of Oily Contaminated Soil", | Reaktor, Vol.19, No. 2, Juli 2019, hlm. 84-88. Jurnal Terakreditasi No. 66b/DIKTI/Kep/2011 ; ; p-ISSN 0852-0798 ; e-ISSN 2407-5973 https://doi.org/10.14710/reaktor.19.2.84-88 https://ejournal.undip.ac.id/index.php/reaktor/issue/view/2567 |
| 4 | Pujawati Suryatmana Parnadi., Edwan Kardena. , Enny Ratnaningsih., Wisjnuaprpto, "Improving The Effectiveness of Crude-Oil Hydrocarbon Biodegradation Employing: Azotobacter Chroococcum as Co-Inoculant", | Microbiology Indonesia, April 2007, Volume 1 Number 1, p.5-10. Jurnal terakreditasi Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, Indonesia No: 030 / E / KPT / 2018, ISSN 1978-3477 https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/42848 https://repository.ipb.ac.id/bitstream/handle/123456789/42848/Pujawati%20Suryatmana%20Parnadi.pdf?sequence=1&isAllowed=y |
| 5 | Syarif Hidayat., Dini Widyani Aghnia., Edwan Kardena. , Qomarudin Helmy, "Kinerja Microbial Fuel Cell dengan Variasi Hambatan Eksternal dalam Menghasilkan Energi Listrik dan Menyisihkan Senyawa Organik pada Limbah Cair | Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan Vol 17, No 3, 2020, hal. 223-232, e-ISSN : 2550-0023, https://doi.org/10.14710/presipitasi.v17i3.223-232 https://ejournal.undip.ac.id/index.php/presipitasi/article/view/31896 |
| 6 | Edwan Kardena , Himawan G Prabowo, Qomarudin Helmy, "Imobilisasi Kultur Campuran Mikroba Dan Karakteristik Aktifitasnya Dalam Menurunkan Organik Dan Amoniak Pada Limbah Cair Domestik", | Jurnal Teknik Lingkungan FTSL-ITB , Vol 26, No 1 (2020), ISSN 2714-6715 https://doi.org/10.5614/j.tl.2020.26.1.5 https://journals.itb.ac.id/index.php/jtl/article/view/14070 |
| 7 | Edwan Kardena , Malinda Syifa Yusharani, "Pemanfaatan Mikroalga Amobil Sebagai Adsorben Pada Penyisihan Zat Warna Reactive Blue 4 (Rb4) Dan Reactive Red 120 (Rr120) Dalam Limbah Cair Tekstil", | Jurnal Ilmiah Arena Tekstil Vol 37, No 2 (2022), (E-ISSN: 2548-7264, P-ISSN: 0518-4010) http://dx.doi.org/10.31266/at.v37i2.7777 http://ejournal.kemenperin.go.id/jjat/article/view/7777 |

Dalam jurnal lainnya

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol tahun; ISSN |
|-----|--|--|
| 1 | Qomarudin Helmy., Pujawati Suryatmana., Edwan Kardena. , Naoyuki Funamizu., Wisjnuprpto, "Biosurfactants Production from Azotobacter sp. and its Application in Biodegradation of Petroleum Hydrocarbon" | Journal of Applied and Industrial Biotechnology In Tropical Region, Vol. 1. 2008 (Special Edition), ISSN:1979-9748 Biosurfactants_Production_from_Azotobacter_sp_and_.pdf |
| 2 | Helmy Qomarudin., Kardena Edwan . , Wisjnuprpto, "Performance of Petrofilic Consortia and Effect of Surfactant Tween 80 Addition in the Oil Sludge Removal Process" | Journal of Applied Sciences in Environmental Sanitation, 2009, Vol. 4 Issue 3, p207-218, EBSCO Information Services ; ISSN : 0126-2807 file:///C:/Users/User/Downloads/2009_JurnalASES.pdf |
| 3 | Kurniasih., Herto Dwi Ariesyady., Aminudin Sulaeman., Edwan Kardena. , "Biosorption of Chromium (VI) Using Immobilized Algal-bloom Biomass: Kinetics and Equilibrium Studies", | International Journal of Environmental and Resource (IJER), Volume 2 Issue 1, February 2013, p.24-31 , ISSN online-2324-7099, ISSN print-2324-6995 https://archive.org/details/IJER023212431 https://ia801209.us.archive.org/13/items/IJER023212431/IJER023_2_1_24_31.pdf |
| 4 | Astri Rinanti., Edwan Kardena. , Dea Indriani Astuti., Kania Dewi, "Screening of Potential Photosynthetic Microalgae from Wastewater Treatment Plant for Carbon dioxide Capture and Storage (CCS)", | Asian Transactions on Science & Technology (ATST ISSN: 2221-4283) Volume 03 Issue 01, March 2013, p. 1-8. ISSN 2221-4283 http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=81A01A3C608719F8FA9DE35C69DA5292?doi=10.1.1.679.9016&rep=rep1&type=pdf |
| 5 | Astri Rinanti., Edwan Kardena. , Dea Indriani Astuti., Kania Dewi, "Growth Response and Chlorophyll Content of Scenedesmus Obliquus Cultivated In Different Artificial Media" | Asian Journal of Environmental Biology, Vol.1 No. 1 (2013) 1-9, E-ISSN 978-983 https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3370.7926 file:///C:/Users/User/Downloads/5AsianJournalofEnvironmentalBiology.pdf |
| 6 | A. Rinanti., E. Kardena. , D.I. Astuti., K. Dewi, "Integrated Vertical Photobioreactor System for Carbon Dioxide Remobal Using Phototrophic Microalgae" | Negerian Journal of Technology (NIJOTECH), Volume 32, Number 2, July 2013, ISSN 1115-8443, P.225-232 https://www.nijotech.com/index.php/nijotech/issue/view/62 |
| 7 | Qomarudin Helmy., Edwan Kardena. , "Petroleum Oil and Gas Industry Waste Treatment; Common Practice in Indonesia" | Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology, Volume 6 Issue 5, (2015), p. 1-7. ISSN 2157-7463 https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000241 https://www.walshmedicalmedia.com/archive/jpeb-volume-6-issue-5-year-2015.html |
| 8 | Astri Riananti., Dea Indriani Astuti., Kania Dewi., Edwan Kardena. , "Enhancing the Efficiency of Carbon dioxide Removal by Synergizing Constructed Microalgae Consortium in Closed System Photobioreactor" | Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences, Vol. 18, Issue 2, 2016, page no. (339-344), ISSN 0972-3005 http://www.envirobiotechjournals.com/issue_articles.php?iid=212&jid=1 |
| 9 | Edwan Kardena. , Syarif Hidayat., Silvia Nora., Qomarudin Helmy, "Biological Treatment of Synthetic Oilfield-Produced Water in Activated Sludge, Using a Consortium of Endogenous Bacteria Isolated from A Tropical Area" | Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology, 2017 Volume 8 • Issue 3 • 1000331, ISSN: 2157-7463 https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000331 https://www.walshmedicalmedia.com/archive/jpeb-volume-8-issue-3-year-2017.html |
| 10 | Lely Fitriyani., Edwan Kardena. , Sukandar., Qomarudin Helmy, "Optimization Approach for Solvent Extraction Process of Oily Contaminated Soil eith Addition of Biosurfactant" | Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Vol. 43 No. 2, Feb 2021, P. 117-124, pISSN 1225-5025, eISSN 2383-7810 https://doi.org/10.4491/KSEE.2021.43.2.117 https://www.jksee.or.kr/journal/view.php?doi=10.4491/KSEE.2021.43.2.117 |

Dalam *prosiding* seminar internasional, conference

| No. | Pengarang; Judul makalah | Nama Seminar; Tahun; ISBN; Tempat publikasi |
|-----|---|---|
| 1. | Qomarudin Helmy, Rudy Laksmono, and Edwan Kardena , "Bioremediation of Aged Petroleum Oil Contaminated Soil: from Laboratory Scale to Full Scale Application", | 2nd Humboldt Kolleg in Konjunction with International Conference on Natural Sciences, HK-ICONS 2014. Procedia Chemistry 14 (2015) 326-333, ISBN 1876-6196 https://doi.org/10.1016/j.proche.2015.03.045 |
| 2 | E. Kardena , S.L. Ridhati, and Q. Helmy, "Molecular Imprinted Hydrogel Polymer (MIHP) as Microbial Immobilization Media in Articial Produced Water Treatment" | The 4th International Seminar on Sustainable Urban Development, IOP Publishing Ltd. April 03, 2018, ISBN 1755-1315 https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012088 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/106/1/012088 |
| 3 | D M Arsyah, E. Kardena , and Q. Helmy, 2018, "Characterization of Biosurfactant Produced by Petrofilic Bacteria Isolated from Hydrocarbon Impacted Soil and its Potential Application in Bioremediation", | The 4th International Seminar on Sustainable Urban Development, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 106 (2018) 012101, IOP Publishing Ltd. ISBN 1755-1315 https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012101 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/106/1/012101 |
| 4 | L A Devianto, C E L Latunussa, Q Helmy and Edwan Kardena , "Biosurfactants production using glucose and molasses as carbon sources by Azotobacter vinelandii and soil washing application in hydrocarbon-contaminated soil", | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 475, International Conference on Green Agro-industry and Bioeconomy 26-27 August 2019, Malang East Java Indonesia, ISBN 1755-1315 https://doi.org/10.1088/1755-1315/475/1/012075 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/475/1/012075 |
| 5 | Okti Dinasakti Nurul Mentari, Qomarudin Helmy, and Edwan Kardena , "Sulfide removal using immobilized living cell in alginate matrices in anaerobic condition | E3S Web Conferences Volume 148 , (2020), 05008 , eISSN 2267-1242 https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014805008 |
| 6 | M Leslie., E Kardena. , Q Helmy, "Biosurfactant and chemical surfactant effectiveness test for oil spills treatment in a saline environment", | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 896, The 3rd International Conference on Environment, Sustainability Issues, and Community Development 9 September 2021, Semarang, Indonesia (Virtual), ISBN 1755-1315 https://doi.org/10.1088/1755-1315/896/1/012041 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/896/1/012041/pdf |
| 7 | Qomaruddin Helmy, Syarif Hidayat, Wisjnuprpto, and Edwan Kardena , "Biosurfactant Produced from Azotobacter vinelandii and its application for Enhanced Oil Slude Biodegradation Process", | Proceedings the 4th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, Shibaura Institute of Technology, February 25, 2010, ISSN 1882-5796 https://ftsl.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/8/2022/07/2.-Biosurfactant-Produced-from-Azotobacter-Vinelandii.pdf |
| 8 | Edwan Kardena , "The Status of CDM Project in Indonesia: Their Futures, Governmental Policies and Obstacles", pp. 1-14, Korea, 2010 | https://ftsl.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/8/2022/07/8.-The-Status-of-CDM.pdf |
| 9 | Doni Sgiyana, Marisa Handajani, Edwan Kardena , and Suprihanto Notodarmojo, "Photocatalytic Decolorization Treatment of Textile dye Wastewater by Using TiO2 Nanofibers", | Proceedings Asian Workshop on Polymer Processing in Vietnam, December 7-20, 2010, Hanoi, Vietnam. https://ftsl.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/8/2022/07/4.-Photocatalytic-Decolorization.pdf |
| 10 | Kurniasih, Edwan Kardena , Aminudin Sulaeman, and Hertto D. Ariesyady, 2011, "Preliminary characterization of sorptive properties of phytoplanktonic consortium in tropical environment" | Proceedings the 5th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, Hanoi University of Science & Technology, Ha Noi, Vietnam, February 24th, 2011, ISSN 1882-5796, https://ftsl.itb.ac.id/wp-content/uploads/sites/8/2022/07/5.-Preliminary-Characterization.pdf |

VII. PENGHARGAAN

1. International Visitor Leadership Program (IVLP), Kedutaan Besar Amnerika Serikat, 2009
2. Encouragement Award, Asia Innovation Award 2020, Hitachi Foundation, Tokyo, 2020.

VIII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Dosen

ITB PRESS

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132
☎ +62 22 20469057
🌐 www.itbpress.id
✉ office@itbpress.id
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132
E-mail: sekretariat-fgb@itb.ac.id
Telp. (022) 2512532
🌐 fgb.itb.ac.id [FgbItb](#) [FGB_ITB](#)
📱 [@fgbitb_1920](#) 📺 [Forum Guru Besar ITB](#)

ISBN 978-623-297-440-1

