



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



TEKNOLOGI REMEDIASI

**Rekayasa Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup
untuk Pencapaian Target Pembangunan yang Berkelanjutan**

Profesor Agus Jatnika Effendi

**Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
18 Maret 2023**

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

TEKNOLOGI REMEDIASI
Rekayasa Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup
untuk Pencapaian Target Pembangunan yang
Berkelanjutan

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

TEKNOLOGI REMEDIASI
Rekayasa Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup
untuk Pencapaian Target Pembangunan yang
Berkelanjutan

Profesor Agus Jatnika Effendi

18 Maret 2023
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:

Teknologi Remediasi: Rekayasa Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup untuk Pencapaian Target Pembangunan yang Berkelanjutan

Penulis : Profesor Agus Jatnika Effendi
Editor Bahasa : Rina Lestari
Layout : Ripky
Cetakan I : 2023
ISBN : 978-623-297-291-9

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

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Swt. hanya kepada-Nya kita memohon ampunan dan pertolongan dari segala persoalan. Shalawat serta salam semoga senantiasa terlimpah-curahkan kepada Nabi Muhammad Saw., seluruh keluarganya, para sahabatnya dan seluruh umat yang beriman kepadanya sampai akhir jaman. Alhamdulillah, akhirnya penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini sebagai bentuk salah satu pertanggungjawaban atas jabatan Guru Besar yang ditugaskan pada penulis. Penghargaan, rasa hormat, serta terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar (FGB) Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya saya menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ini.

Sebagai Guru Besar dalam bidang Remediasi Lingkungan di Institut Teknologi Bandung, penulis memiliki kewajiban untuk mengembangkan bidang keilmuan tersebut untuk kesejahteraan manusia pada umumnya melalui kerja sama dengan berbagai pihak sesuai perannya masing-masing untuk memulihkan fungsi lingkungan hidup yang berkelanjutan. Lebih dari itu, seorang Guru Besar memiliki kewajiban untuk berperan serta dalam pembinaan kehidupan akademik dan integritas moral sivitas akademika ITB sesuai dengan bidang keilmuan dan jabatan yang diembannya. Semoga orasi ilmiah yang berjudul “Teknologi Remediasi: Rekayasa Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup untuk Pencapaian Target Pembangunan yang Berkelanjutan” ini dapat memberikan wawasan dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 18 Maret 2023

Prof. Agus Jatnika Effendi

SINOPSIS

Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup adalah serangkaian kegiatan penanganan lahan terkontaminasi yang meliputi kegiatan perencanaan, pelaksanaan, evaluasi, dan pemantauan untuk memulihkan fungsi lingkungan hidup yang disebabkan oleh pencemaran lingkungan hidup dan/atau kerusakan lingkungan hidup. Secara global, pemulihan fungsi lingkungan hidup akan sangat terkait dengan pencapaian target-target yang sudah digariskan oleh Persatuan Bangsa Bangsa (PBB) dalam 7 target *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang sangat relevan dan terkait dengan pemulihan tanah dan air tanah yang terkontaminasi yaitu *zero hunger, good health & well-being, clean water & sanitation, sustainable cities & communities, responsible consumptions & productions, climate action* dan *life on land*. Pendekatan rekayasa atau disebut juga teknik remediasi, untuk memulihkan fungsi lingkungan hidup ini telah banyak dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir. Berbagai teknik remediasi telah diaplikasikan dalam skala lapangan untuk memulihkan tanah yang tercemar oleh berbagai jenis kontaminan dalam upaya meminimalisir dampak negatif terhadap makhluk hidup dan juga material. Secara konseptual, remediasi merupakan tindakan yang bersifat kuratif di mana proses pengolahan akan dilakukan terhadap media lingkungan yang tercemar. Proses pengolahan dalam remediasi dilakukan dengan pendekatan *batch* (curah) atau *semi-batch* di mana pada selang waktu tertentu ada penambahan stimulan yang dapat mempercepat proses. Berdasarkan mekanisme pengolahan yang terjadi dalam proses remediasi, maka teknologi remediasi terbagi menjadi: remediasi secara fisik-kimia, secara biologi atau bioremediasi, secara termal, dan pendekatan lainnya seperti pengerukan-penimbunan, pewadahan, termasuk didalamnya *residual treatment*. Sedangkan klasifikasi remediasi berdasarkan cara penanganan terhadap karakteristik fisik-kimia dari materi pencemar (*pollutant handling*) yang dapat dibagi menjadi 3 kelompok besar, yaitu immobilisasi, ekstraksi, dan destruksi. Untuk menjamin keberhasilan dari implementasi proses remediasi, maka beberapa tahapan perlu dilakukan. Sehingga, pilihan teknologi pengolahan yang akan diterapkan akan sesuai dengan kebutuhan dan kondisi di lapangan. Tahapan-tahapan tersebut adalah *site characterization*, yang dilanjutkan dengan tahapan *treatability study* dan dilakukan *piloting* sebelum dilaksanakan tahap implementasi. Pada tahap

pelaksanaan akan melibatkan *site preparation & staging*, *pre-treatment*, *treatment* dan *post-treatment/residual management*, yang harus dilaksanakan secara berurutan. Untuk meningkatkan kinerja dari proses remediasi, terutama dengan pendekatan pengolahan biologi atau bioremediasi, berbagai upaya dapat diaplikasikan untuk meningkatkan *bioavailability* yang antara lain melalui proses fisik-kimia sebagai *pre-treatment*. Selain itu, pengembangan teknologi remediasi fisik-kimia lainnya untuk proses percepatan pemulihan fungsi lingkungan hidup seiring dengan meingkatkan pencemaran tanah dan air tanah baik secara kualitatif maupun kuantitatif, perlu dikembangkan seperti proses *smouldering* dan *air cathode electrocoagulation* (ACEC).

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
SINOPSIS	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Pencegahan Pencemaran dan Remediasi.....	2
1.2 Peraturan & Status Pencemaran Tanah di Indonesia.....	4
2 TEKNOLOGI REMEDIASI	8
2.1 Bioremediasi	10
2.2 Remediasi Fisik-Kimia	14
2.3 <i>Thermal</i>	15
3 TAHAPAN DALAM APLIKASI TEKNOLOGI REMEDIASI	16
4 REMEDIASI FISIK-KIMIA UNTUK PENINGKATAN <i>POLLUTANTS</i> <i>BIOAVAILABILITY</i>	20
4.1 Aplikasi <i>Surfactants</i>	20
4.2 Penambahan <i>Oxidizing Agents</i>	22
4.3 Penambahan Katalis.....	24
4.4 Teknologi <i>Electrokinetic Remediation</i> (ER).....	25
4.5 <i>Ultrasonic Remediation</i>	29
5 EKSTRAKSI KONTAMINAN DENGAN TEKNOLOGI <i>SOIL WASHING</i>	32
5.1 Aplikasi <i>Soil Washing</i> pada Tanah Tercemar Minyak Bumi	33
5.2 Aplikasi <i>Soil Washing</i> pada Tanah Tercemar Merkuri	35
6 DESTRUKSI KONTAMINAN DENGAN <i>SMOULDERING</i>	36
7 PEMANFAATAN TEKNOLOGI <i>AIR CATHODE</i> <i>ELECTROCOAGULATION</i> DALAM REMEDIASI.....	38
8 <i>STRUVITE</i> DARI NUTRIENT RECOVERY SEBAGAI <i>REMEDIATION AGENT</i>	40
PENUTUP	42
UCAPAN TERIMA KASIH	42
DAFTAR PUSTAKA.....	44
CURRICULUM VITAE.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Remediasi lingkungan dan pencegahan pencemaran.....	2
Gambar 1.2.	Lahan Terkontaminasi Minyak Bumi	3
Gambar 1.3.	Target pencapaian SDGs yang terkait dengan pemulihan tanah & air tanah	6
Gambar 1.4.	Status pencemaran tanah di Indonesia pada periode 2015-2018.....	7
Gambar 2.1	Klasifikasi Remediasi.....	10
Gambar 2.2	Ilustrasi upaya optimasi dalam bioremediasi	13
Gambar 2.3	Delineasi Tanah Terkontaminasi (A): Titik Pengambilan Sampel; (B) Sebaran Horizontal; (C) Sebaran Vertikal	17
Gambar 4.1	Mekanisme Peningkatan Bioavailability dengan Penambahan Surfactant	21
Gambar 4.2	Penambahan Surfaktan terhadap Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi	22
Gambar 4.3	Penambahan Oksidator dalam Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi	24
Gambar 4.4	Penambahan TiO_2 ntuk Meningkatkan Bioavailability	25
Gambar 4.5	Konfigurasi Electrokinetic Remediation (ER)	26
Gambar 4.6	Penurunan TPH dalam Bioremediasi <i>Landfarming</i> setelah <i>ER Pre-Treatment</i>	28
Gambar 4.7	Migrasi Merkuri dengan Menggunakan ER	28
Gambar 4.8	Konfigurasi <i>Ultrasonic Remediation</i> Skala Laboratorium	30
Gambar 4.9	Pengaruh Rasio S/L pada Penerapan <i>Ultrasonic Remediation</i>	30
Gambar 5.1	Reaktor <i>Soil Washing</i>	33
Gambar 5.2	<i>Soil Washing</i> TPH pada Berbagai Jenis Tanah. (a): <i>sand</i> ; (b) <i>loam</i> ; (c) <i>sandy loam</i>	34
Gambar 5.3	Skema pengolahan TPH secara fisik-kimia-biologi.....	35
Gambar 6.1	Diagram konseptual dan <i>pilot scale</i> proses <i>smouldering</i>	37
Gambar 7.1	Konfigurasi ACEC dalam remediasi tanah tercemar	39
Gambar 7.2	Akumulasi merkuri pada remediasi ACEC	39
Gambar 8.1	Mekanisme Pembentukan Struvite dalam Reaktor ACEC	40
Gambar 8.2	Pembentukan Struvite dalam Reaktor ACEC (a) Pengaruh terhadap Nutrien dalam Air Limbah; (b) Pengaruh Kerapatan Arus yang Terbentuk	41

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Rekapitulasi Tanah Tercemar Limbah B3 di Indonesia (2014 – 2022)	8
Tabel 2.1	Berbagai Teknologi Bioremediasi secara <i>In-situ</i> & <i>Ex-Situ</i>	11
Tabel 2.2	Teknologi Remediasi Fisik-Kimia	15
Tabel 4.1	Hasil GC-MS Sebelum dan Setelah Aplikasi ER.....	27
Tabel 4.2	Hasil GC-MS TPH Sebelum & Setelah Paparan Ultrasonik	31
Tabel 5.1	Fraaksinasi merkuri sebelum & setelah aplikasi <i>soil washing</i>	35
Tabel 6.1	Penurunan Konsentrasi TPH dengan PTP.....	37

1 PENDAHULUAN

Terjadinya pencemaran tanah dan air tanah akan mengakibatkan terjadinya perubahan fungsi lingkungan hidup. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup & Kehutanan (PerMenLHK) No. 101/2018 tentang Pedoman Pemulihan Lahan Terkontaminasi Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) disebutkan bahwa Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup adalah serangkaian kegiatan penanganan lahan terkontaminasi yang meliputi kegiatan perencanaan, pelaksanaan, evaluasi, dan pemantauan untuk memulihkan fungsi lingkungan hidup yang disebabkan oleh pencemaran lingkungan hidup dan/atau kerusakan lingkungan hidup. Dengan demikian, melalui upaya pemulihan atau remediasi, diharapkan paling tidak fungsi lingkungan hidup akan kembali ke daya dukung lingkungan sebelum terjadi pencemaran. Remediasi merupakan salah satu upaya agar *Environmental Sustainability* dapat ditegakan, sebagaimana didefinisikan oleh PBB, yaitu “*meeting the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs*”. Salah satu pilar untuk pencapaian keberlanjutan lingkungan ini adalah aspek lingkungan, selain aspek sosial dan ekonomi.

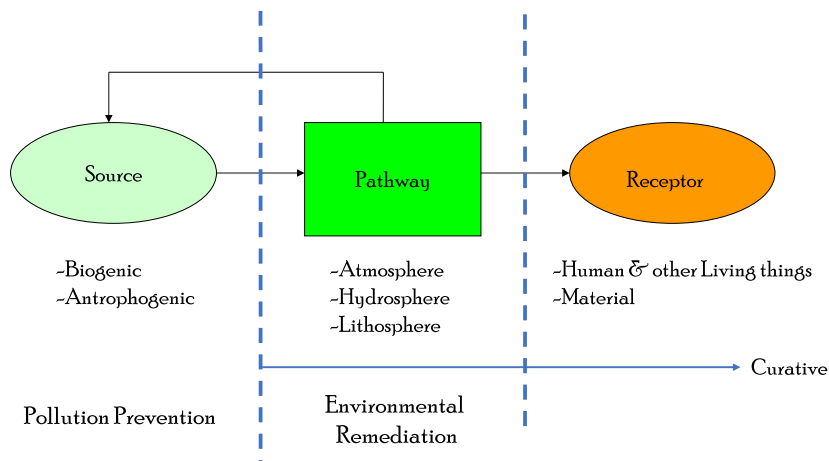
Namun demikian, remediasi tidak terbatas pada lahan yang terkontaminasi, tetapi juga dilaksanakan pada air tanah yang tercemar sebagai akibat dari proses transportasi pencemar dari tanah terkontaminasi. Suprihanto (2005) menyebutkan bahwa pencemaran air tanah dapat terjadi sebagai akibat adanya interaksi antara kontaminan dengan partikel tanah dan air tanah melalui 3 mekanisme *transport* antara lain: adveksi, dispersi hidrodinamik, dan retardasi. Pembahasan selanjutnya dalam tulisan ini akan lebih terfokus pada tanah terkontaminasi dengan mengacu pada pengalaman laboratorium maupun pengalaman lapangan penulis.

Pendekatan rekayasa atau disebut juga teknik remediasi, untuk memulihkan fungsi lingkungan hidup ini telah banyak dikembangkan dalam beberapa dekade terakhir. Berbagai teknik remediasi telah diaplikasikan dalam skala lapangan untuk memulihkan tanah yang tercemar oleh berbagai jenis kontaminan dalam upaya meminimalisir dampak negatif terhadap makhluk hidup dan juga material. Berbagai teknik remediasi tanah tercemar yang cukup populer dan sudah banyak digunakan serta sudah terbukti merupakan teknologi yang tepat guna adalah (1) *Soil Vapor Extraction*, (2) *soil*

washing, (3) *stabilization/solidification*, (4) *electrokinetic remediation*, (5) *thermal desorption*, (6) *vitrification*, (7) *bioremediation* dan (8) *phytoremediation* (Sharma & Reddy, 2004). Semua teknik ini dapat diterapkan baik *in-situ* maupun secara *ex-situ* dengan berbagai modifikasi di mana akan melibatkan proses fisik, kimia, termal, elektrokinetik, maupun biologi.

1.1 Pencegahan Pencemaran dan Remediasi

Secara konseptual, remediasi merupakan tindakan yang bersifat kuratif di mana proses pengolahan akan dilakukan terhadap media lingkungan yang tercemar. Hal ini sangat berbeda dengan upaya pencegahan pencemaran (*pollution prevention*) di mana proses pengolahan ditujukan untuk limbah yang terbentuk dari proses/aktivitas manusia terlepas ke lingkungan dalam konsentrasi yang telah ditetapkan sesuai dengan peraturan atau baku mutu yang berlaku. Gambar 1 memperlihatkan konsep dasar pencemaran lingkungan yang akan melibatkan 3 komponen, yaitu Sumber/*Source*, Media Penghantaran/*Pathway* dan Penerima/*Receptor* atau yang dikenal juga sebagai konsep **SPR**. Mengacu pada konsep SPR yang ditampilkan dalam gambar 1 ini, maka dapat dijelaskan beberapa hal pembeda antara upaya *pollution prevention* dan *remediation*.



Gambar 1.1 Remediasi lingkungan dan pencegahan pencemaran

Remediasi lingkungan (*Environmental Remediation*) ditandai oleh beberapa hal yang menjadi pembeda dibandingkan dengan pencegahan pencemaran (*Pollution Prevention*). Sesuai dengan asal katanya, yaitu *remedy* yang berarti pemulihan, maka remediasi adalah proses pengolahan yang

ditujukan untuk memulihkan tanah atau air tanah yang terkontaminasi ke kondisi semula atau kondisi acuan. Sehingga, yang menjadi target dalam proses pengolahan adalah media penghantarannya. Hal ini berbeda dengan upaya *pollution prevention* yang ditujukan untuk mencegah emisi pencemar ke lingkungan. Pencemaran lingkungan dapat terjadi oleh beberapa hal yang antara lain adalah akibat praktik masa lalu yang membolehkan *dumping* pencemar di dalam tanah, akibat dari kecelakaan kerja, dan praktik-praktik lainnya yang mengakibatkan terjadinya *transport* pencemar ke media penghantaran (tanah dan air tanah) seperti yang terlihat pada Gambar 1.2 berikut. Sehingga berdasarkan uraian ini maka remediasi dapat diklasifikasikan sebagai tindakan kuratif.



Gambar 1.2. Lahan Terkontaminasi Minyak Bumi
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Kontaminasi atau pencemaran lingkungan pada dasarnya terjadi akibat suatu tindakan atau kejadian yang tidak menjadi bagian dari operasi suatu kegiatan. Sehingga aliran masa pencemar atau kontaminan ke lingkungan berlangsung sesaat atau dengan jeda waktu yang relatif singkat. Dengan karakteristik aliran masa seperti ini, maka proses pengolahan dalam remediasi dilakukan dengan pendekatan *batch* (curah) atau *semi-batch* di mana pada selang waktu tertentu ada penambahan stimulan yang dapat mempercepat proses. Sehingga apabila ditinjau dari sisi teori reaktor, maka remediasi secara *engineering* adalah penerapan dari neraca masa integratif di mana kontaminan atau pencemar akan diolah dalam suatu reaktor pada selang waktu tertentu hingga mencapai konsentrasi yang diharapkan.

Selain itu, biaya pengolahan dalam pemulihan tanah dan atau air tanah yang tercemar relatif jauh lebih mahal apabila dibandingkan dengan biaya pengolahan pada pencegahan pencemaran. Banyak faktor yang memengaruhi biaya pengolahan ini yang antara lain adalah sebagai

konsekuensi dari aliran masa yang tidak kontinu di mana konsekuensinya pengolahan dilakukan dalam reaktor curah. Selain itu juga, kemudahan akses menuju lokasi lahan yang tercemar dan kemungkinan diperlukannya membuka lahan serta proses *excavation* dan kebutuhan sarana transportasi apabila pengolahan dilakukan secara *ex-situ* termasuk aspek perizinan. Faktor lainnya yang akan sangat berpengaruh dalam aspek pembiayaan adalah karakterisasi lokasi yang akan dijelaskan lebih lanjut dalam tahapan remediasi. Berikut adalah beberapa contoh biaya pengolahan dalam remediasi lahan terkontaminasi secara fisik-kimia, biologi dan termal, berdasarkan pengalaman penulis maupun informasi yang didapatkan dari berbagai sumber:

- Bioremediasi: USD20 – USD80/ton
- Soil Washing: USD70 – USD190/ton
- Thermal desorption: USD80 – USD200/ton

1.2 Peraturan & Status Pencemaran Tanah di Indonesia

Peraturan-peraturan terkait lingkungan hidup pada dasarnya bersumber dari Undang Undang Lingkungan Hidup No. 23 Tahun 1997 yang kemudian diperbaharui dalam UULH No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang kemudian pelaksanaan teknis terkait pemulihan lingkungan diturunkan dalam Peraturan Menteri LHK No. 101 Tahun 2018 tentang Pedoman Pemulihan Lahan Terkontaminasi Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Apabila mengacu pada peraturan ini, maka tahapan pemulihan lingkungan secara garis besar dan berurutan adalah sebagai berikut:

- Perencanaan; termasuk di dalamnya pengumpulan dan data serta informasi untuk menggambarkan karakteristik fisik & kimia dari lahan yang terkontaminasi di mana *ouput* dari kegiatan ini adalah persetujuan terhadap dokumen Rencana Pemulihan Fungsi Lingkungan Hidup (RPFLH) yang diterbitkan oleh KLHK.
- Pelaksanaan; pada tahap ini berbagai Teknik remediasi fisik-kimia-biologi-termal dapat diaplikasikan sesuai dengan perencanaan yang tertuang dalam dokumen RPFLH yang sudah disetujui, termasuk didalamnya adalah durasi serta persyaratan lainnya yang harus dipenuhi.
- Pemantauan; bertujuan untuk memastikan pelaksanaan pemulihan lingkungan berjalan dengan baik terutama kesesuaian dengan perencanaan yang telah dituangkan dalam RPFLH.

- Evaluasi; penilaian terhadap hasil akhir proses pemulihan di mana yang menjadi acuan adalah standar atau baku mutu lingkungan yang berlaku dalam hal ini adalah sesuai dengan yang tertuang dalam PP 22/2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Apabila sudah memenuhi baku mutu lingkungan yang sudah ditetapkan, maka KLHK akan menerbitkan Surat Status Penyelesaian Lahan Terkontaminasi (SSPLT) atau dilakukan pembersihan ulang dan atau peninjauan Kembali perencanaannya apabila belum memenuhi syarat yang ditetapkan.
- Pemantauan Pascapemulihan; bertujuan untuk memantau kualitas lingkungan pascapemulihan lahan terkontaminasi agar tidak berdampak terhadap reseptor di sekitar lahan tersebut.

Aplikasi keilmuan dan teknologi remediasi dalam pemulihan fungsi lingkungan hidup sesuai dengan aturan yang berlaku di Indonesia ini akan sangat berperan dalam tahapan perencanaan dan pelaksanaan. Dalam tahapan perencanaan, penetapan, dan pemilihan teknologi remediasi yang akan digunakan harus didasarkan pada pendekatan ilmiah terutama terkait *site characterization* dan *treatability study*. Sedangkan pada tahap pelaksanaan teknologi remediasi terpilih akan diuji dengan faktor eksternal dan variabel lingkungan yang lebih kompleks untuk mencapai tingkat keberhasilan yang sudah ditetapkan dalam bentuk baku mutu sebagai *performance indicators*.

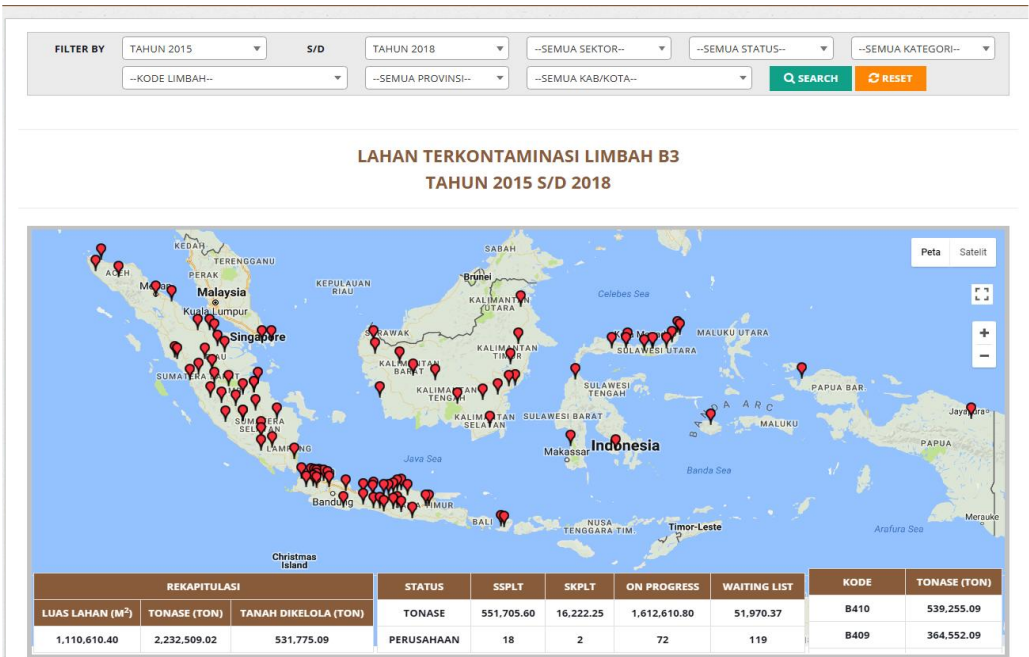
Secara global, pemulihan fungsi lingkungan hidup akan sangat terkait dengan pencapaian target-target yang sudah digariskan oleh Persatuan Bangsa Bangsa (PBB) dalam Sustainable Development Goals (SDGs). Gambar 1.3 berikut menunjukan paling tidak ada 7 target SDGs yang sangat relevan dan terkait dengan pemulihan tanah dan air tanah yang terkontaminasi yaitu *zero hunger*, *good health & well-being*, *clean water & sanitation*, *sustainable cities & communities*, *responsible consumptions & productions*, *climate action* dan *life on land* (target 2, 3, 6, 11, 12, 13 dan 15 secara berurutan). Hal ini sejalan dengan laporan FAO dan UNEP (2021) tentang Global Assessment of Soil Pollution. Sehingga terlihat bahwa teknologi remediasi berperan penting dalam pencapaian target target SDGs agar fungsi lingkungan hidup dapat dipulihkan fungsi lingkungan hidup.



Gambar 1.3. Target pencapaian SDGs yang terkait dengan pemulihan tanah & air tanah
Sumber: United Nations Sustainable Development Goals

Gambar 1.4 berikut menunjukkan status dan temuan tanah yang terkontaminasi limbah B3 di wilayah Republik Indonesia. Berdasarkan data tersebut teridentifikasi sebanyak 1,1 juta m³ atau 2,2 juta ton tanah terkontaminasi limbah B3 dari sumber institusi dan yang sudah berhasil dikelola sekitar 25% nya (atau sekitar 531 ribu ton). Seperti halnya kasus pencemaran lingkungan yang lainnya, informasi ini bisa saja merupakan fenomena gunung es di mana jumlah yang tidak terlihat/belum ditemukan

dapat jauh lebih besar dari data yang tersajikan. Kasus-kasus pencemaran tanah dari sumber non-institusi, misalnya seperti kegiatan Penambangan Emas Skala Kecil (PESK), /bengkel kerja skala kecil, merupakan bagian terbesar dari fenomena gunung es ini. Selain itu, laju pemulihan lahan terlihat lebih lambat daripada temuan kasus-kasus pencemaran yang terjadi. Hal ini merupakan tantangan dalam pengembangan teknologi remediasi, dimana inovasi-inovasi masih sangat terbuka lebar untuk membuat teknologi remediasi menjadi semakin optimum baik secara teknis, waktu, dan finansial.



Gambar 1.4. Status pencemaran tanah di Indonesia pada periode 2015-2018
Sumber: KLHK (2021)

Tabel 1.1 berikut menunjukkan data lahan terkontaminasi limbah B3 di Indonesia dari tahun 2014 sampai tahun 2022, termasuk luas lahan dan tonase dari tanah tercemarnya serta besaran lahan terkontaminasi yang sudah dan atau sedang dikelola. Seperti telah disebutkan di atas bahwa potensi temuan lahan terkontaminasi limbah B3 dari tahun ke tahun bisa terus bertambah sesuai dengan laporan dan kemajuan teknologi dalam pendeteksian pencemaran limbah B3.

Tabel 1.1 Rekapitulasi Tanah Tercemar Limbah B3 di Indonesia (2014 – 2022)

Tahun	Luas Lahan Terkontaminasi (m ²)	Tonase Lahan Terkontaminasi (ton)	Tanah Terkontaminasi Dikelola (ton)
2014	149.645,00	539.938,10	524.343,28
2015	150.723,11	775.726,17	406.314,17
2016	87.339,67	244.551,60	219.995,75
2017	386.024,22	868.568,04	760.647,49
2018	826.936,95	714.110,70	477.323,35
2019	1.258.345,08	1.338.438,95	770.780,14
2020	619.112,32	751.880,42	674.041,51
2021	2.018.299,64	2.255.503,48	2.084.052,03
2022	1.214.203,00	498.560,75	137.008,51
Total	6.710.628,99	7.987.278,27	6.054.506,22

Sumber: <http://plttldb3.menlhk.go.id/database-2021>

2 TEKNOLOGI REMEDIASI

Seperti telah dijelaskan di atas, pada dasarnya teknologi remediasi adalah suatu upaya pendekatan rekayasa untuk memulihkan tanah dan air tanah yang tercemar, termasuk di dalamnya larutan maupun *off-gas* yang dihasilkan dari proses, ke kondisi acuan yang telah ditetapkan oleh undang-undang atau peraturan yang berlaku. Selain itu, dengan dilakukannya upaya pemulihan ini, maka dapat terhindarkannya pelaku pencemaran dari *future liability*. Berdasarkan mekanisme pengolahan yang terjadi dalam proses remediasi, maka teknologi remediasi terbagi menjadi:

- Remediasi secara fisik-kimia
- Remediasi secara biologi atau bioremediasi
- Remediasi secara termal
- Pendekatan lain: pengerukan-penimbunan, pewadahan, termasuk didalamnya *residual treatment*

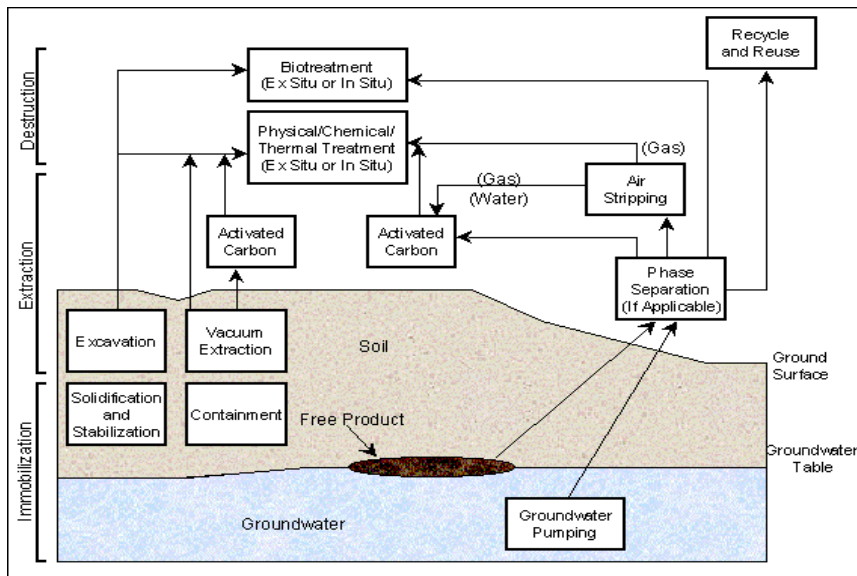
Penjelasan lebih rinci terkait berbagai pendekatan teknologi remediasi ini akan dijelaskan pada pembahasan berikutnya. Gambar 2.1 berikut menunjukkan klasifikasi remediasi berdasarkan cara penanganan terhadap karakteristik fisik-kimia dari materi pencemar (*pollutant handling*) yang dapat dibagi menjadi 3 kelompok besar, yaitu:

- Imobilisasi; termasuk di dalamnya adalah proses stabilisasi dan solidifikasi (S/S) dan pewadahan (containment). Pendekatan ini dilakukan ketika karakteristik fisik-kimia dari polutan tidak memungkinkan diolah dengan berbagai pendekatan teknologi yang tersedia saat ini, misalnya tanah yang

terkontaminasi oleh senyawa radioaktif atau kontaminan yang secara kimia sangat tidak stabil dan atau memiliki karakteristik fisik yang sangat *mobile* sehingga memiliki resiko tinggi terjadinya transportasi ke lapisan yang lebih dalam lagi meskipun secara teoritis dapat dilakukan pengolahan dengan pendekatan fisik-kimia-biologi.

- b. Ekstraksi; dalam proses ekstraksi kontaminan/polutan dari tanah atau air tanah yang terkontaminasi, maka akan melibatkan pengolahan secara fisik-kimia dan termal serta proses ekskavasi (pengerukan) apabila karakteristik fisik-kimia dari polutan memungkinkan serta terjadi di lapisan tanah yang tidak terlalu dalam sehingga proses pemindahan material dapat dilakukan. Proses ekskavasi ini biasanya dilakukan ketika pencemaran terjadi di lapisan atas (*top soil*) hingga lapisan tengah (bawah *top soil*) atau hingga lapisan yang secara teknis memungkinkan dilakukannya ekskavasi. Tanah tercemar yang sudah dikeruk ini, kemudian diekstraksi dengan pendekatan fisik-kimia untuk memisahkan kontaminan/polutan dari tanah tersebut. Proses ekstraksi ini dapat dilakukan secara *on-site* ataupun *off-site* tergantung pada kondisi setempat. Sedangkan proses *vacuum extraction* dilakukan ketika pencemar memiliki karakteristik yang *volatile* atau *semi-volatile* dan dilaksanakan secara *in-situ*. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya volatilisasi pencemar apabila dilakukan pengerukan terjadi transportasi pencemar ke lingkungan udara. Beberapa contoh teknologi ekstraksi yang sudah banyak diaplikasikan dalam proses remediasi antara lain adalah *soil washing*, *soil flushing*, *thermal desorption*, *soil vapor extraction (SVE)*, *soil venting*, dan lain-lain.
- c. Destruksi; proses destruksi ini akan diterapkan ketika polutan/kontaminan secara fisik-kimia dan atau biologi memungkinkan untuk didegradasi menjadi senyawa yang lebih sederhana dan *less hazardous* atau bahkan dimineralisasi baik secara *in-situ* maupun *ex-situ*. Pendekatan teknologi remediasi untuk destruksi ini dapat dilakukan dengan remediasi secara fisik-kimia, biologi maupun termal. Remediasi secara biologi atau bioremediasi merupakan teknik remediasi yang paling banyak diaplikasikan pada saat polutan/kontaminan terkategori sebagai substansi/senyawa yang *biodegradable*. Meskipun pendekatan remediasi fisik-kimia memungkinkan, pada umumnya bioremediasi akan menjadi menjadi pilihan utama karena biaya pengolahannya relatif lebih murah. Beberapa contoh teknologi bioremediasi secara *in-situ* adalah *bio-venting*,

phyto-remediation, dan *myco-remediation*, sedangkan untuk pengolahan secara *ex-situ* adalah *land farming*, *windrowing*, dan *biopile*. Destruksi secara fisik-kimia dalam teknologi remediasi yang banyak diterapkan antara lain adalah *chemical oxidation*, termasuk di dalamnya pendekatan *advanced oxidation process* (AOP). Destruksi secara termal atau kombusi yang paling banyak diaplikasikan adalah proses insinerasi.



Gambar 2.1 Klasifikasi Remediasi
(Sumber: Forum Remediation Technology Roundtable, USEPA 2001)

2.1 Bioremediasi

Meskipun banyak pilihan teknologi yang tersedia, alternatif utama dalam pemilihan teknologi remediasi adalah “*natural attenuation*”, yaitu ditujukan apabila pencemaran yang terjadi memiliki potensi untuk terjadinya degradasi oleh “*naturally occurring microorganisms*”. Pendekatan ini merupakan pendekatan yang paling “*less intervention*” dibandingkan teknologi lainnya, sehingga sesuai dengan tujuan dari pemulihan lingkungan, yaitu mengembalikan kondisi tanah tercemar ke kondisi acuan. Secara umum pendekatan bioremediasi merupakan teknologi yang paling ekonomis apabila dibandingkan dengan teknologi lainnya, terutama apabila pencemarnya didominasi oleh senyawa organik (dimana senyawa hidrokarbon termasuk di dalamnya) dan tanahnya memiliki “*hydraulic conductivity*” yang cukup untuk menyalurkan nutrisi dan suplai oksigen. Tabel 1.2 berikut menunjukkan

beberapa teknologi bioremediasi yang terkategori sebagai *best practice technology* maupun *best available technology*.

Tabel 2.1 Berbagai Teknologi Bioremediasi secara *In-situ* & *Ex-Situ*

Tanah dan Lumpur	Air Tanah
<i>In Situ Biological Treatment</i> • <i>Bioventing</i> • <i>Enhanced Bioremediation</i> • <i>Phytoremediation</i>	<i>In Situ Biological Treatment</i> • <i>Enhanced Bioremediation</i> • <i>Monitored Natural Attenuation</i> • <i>Phytoremediation</i>
<i>Ex Situ Biological Treatment</i> • <i>Biopiles</i> • <i>Composting</i> • <i>Landfarming</i> • <i>Slurry Phase Biological Treatment</i>	<i>Ex Situ Biological Treatment</i> • <i>Bioreactors</i> • <i>Constructed Wetlands</i>

Pada dasarnya bioremediasi adalah proses optimasi kontak antara mikroorganisme dengan polutan/kontaminan yang akan dimanfaatkan oleh mikroorganisme tersebut sebagai sumber energi dan/atau sumber karbon. Optimasi yang dilakukan agar proses biodegradasi dalam proses bioremediasi berlangsung dan dapat memulihkan tanah atau air tanah yang terkontaminasi sesuai dengan *end point criteria* yang ditetapkan khususnya dengan pendekatan *ex situ bioremediation* antara lain adalah:

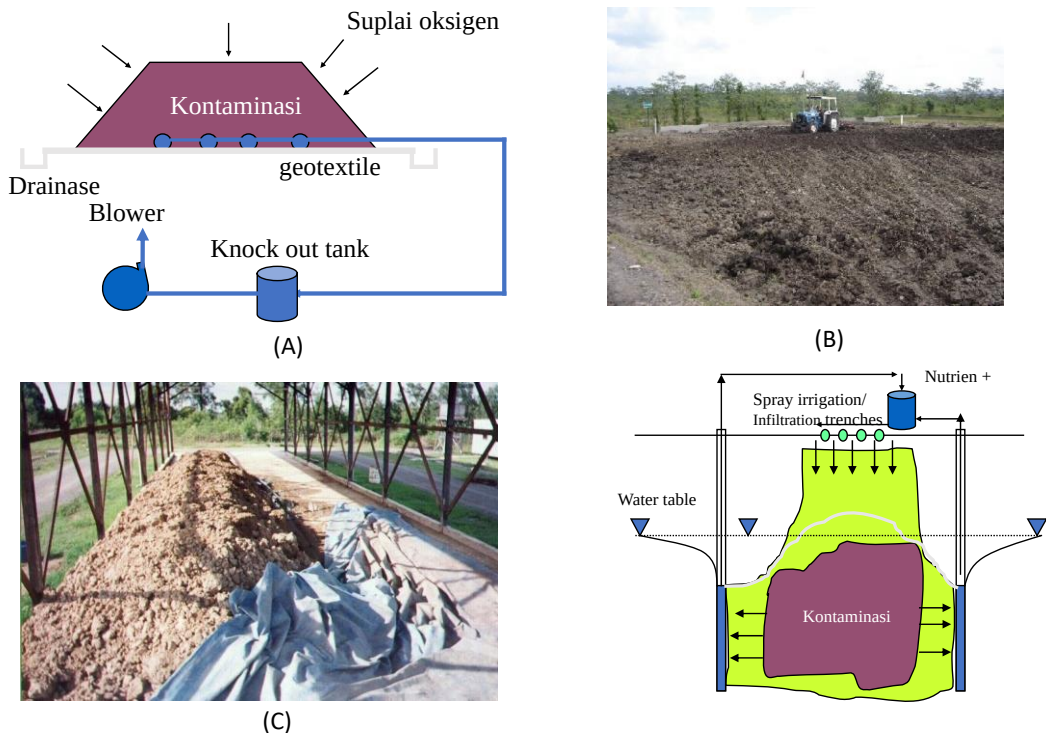
- a. Ketersediaan Substrat dan Nutrien; proses biologi akan berlangsung apabila suplai makro dan mikro nutrien cukup. Kehadiran makro nutrien berupa unsur C, N & P merupakan parameter kunci dalam metabolisme mikroorganisme yang terlibat dalam proses bioremediasi. Komposisi yang umumnya dipertahankan untuk C:N:P adalah dalam kisaran 100:10-5:1. Substrat di mana dalam hal ini adalah polutan/pencemar akan digunakan sebagai sumber C (karbon) dan sumber energi bagi mikroorganisme untuk tumbuh/*growth*. Konsentrasi N dan P akan menyesuaikan dengan konsentrasi substrat sebagai pencemar yang merupakan sumber C hingga mencapai komposisi C:N:P yang ideal. Penambahan N dan P dalam jumlah yang optimal merupakan hal yang esensial. Secara teoretis, akan diperlukan kurang lebih 150 mg N dan 30 mg P untuk mengkonversi 1 gr hidrokarbon menjadi sel bakteri. Secara praktis, sumber N dan P yang ditambahkan untuk proses optimasi bersumber dari pupuk/fertilizer.
- b. *Delivery* Elektron akseptor; secara biokimia, biodegradasi akan berjalan apabila terjadi proses transfer elektron, sehingga kehadiran donor dan akseptor elektron merupakan kunci penting keberhasilan proses bioremediasi. Dalam proses bioremediasi, donor elektron akan bersumber dari substrat atau pencemar yang hadir di dalam tanah atau air

tanah. Sedangkan untuk kebutuhan akseptor elektron, dalam proses bioremediasi biasanya berasal dari sumber eksternal. Secara praktis, bioremediasi yang saat ini diterapkan adalah proses aerob di mana akseptor elektron bersumber dari *free oxygen* (O_2). Sehingga kehadiran oksigen sebagai akseptor elektron menjadi salah parameter kontrol dan operasi yang penting untuk dioptimasi. Dalam aplikasinya 2 (dua) sumber akseptor elektron yang sering digunakan adalah dari senyawa H_2O_2 dan O_2 yang bersumber dari udara/atmosfir di mana terdapat kurang lebih 21% oksigen bebas. Mengingat reaktivitasnya yang tinggi, penggunaan senyawa H_2O_2 memerlukan kajian yang mendalam agar tidak berdampak lebih buruk terhadap kualitas tanah olahan. Sumber akseptor elektron yang paling banyak digunakan dalam proses bioremediasi adalah oksigen yang bersumber dari udara bebas dengan pertimbangan kemudahan untuk mendapatkan dan pengendalian operasi. Berdasarkan optimasi cara *delivery* oksigen dari udara, maka dikembangkan beberapa Teknik yang saat ini sudah banyak diaplikasikan:

- *Landfarming*: *delivery* oksigen dengan cara melakukan pembalikan tanah melalui pembajakan (*tilling*) secara rutin
- *Windrowing/composting*: proses transfer oksigen dilakukan secara pasif dengan memperbaiki struktur tanah tercemar melalui penambahan *bulking agent* di mana salah satunya bertujuan untuk meningkatkan porositas tanah agar difusi oksigen dapat berjalan secara baik. Proses pembalikan dilakukan secara periodik untuk distribusi panas yang terbentuk akibat terjadinya fase *thermophilic* dalam proses *windrowing* sehingga proses difusi oksigen dapat terjadi tanpa terganggu oleh adanya gradien temperatur yang relatif tinggi.
- *Biopile*: proses *delivery* oksigen dilakukan secara aktif melalui injeksi oksigen ke gundukan/pile tanah yang akan diolah sehingga proses bioremediasi dengan cara ini disebut juga sebagai *aerated static biopile*. Oksigen terdifusi ke dalam tanah olahan dengan bantuan pompa atau blower melalui sistem *perforated underdrain system* baik dengan cara diisap ataupun ditiup. Melalui cara aerasi aktif seperti ini, maka diharapkan seluruh bagian tanah akan mendapatkan suplai oksigen yang cukup. Berdasarkan praktik-praktik terbaik yang pernah dilakukan, konsentrasi optimum oksigen di dalam proses *biopile* adalah dalam kisaran 10-12%.
- *Bioventing* merupakan contoh dari *in situ bioremediation* yang bertujuan untuk melakukan optimasi ketersediaan nutrien dan suplai oksigen secara

bersamaan di lapisan tanah yang tidak jenuh (*vadose zone*). Nutrien disalurkan ke area tanah tercemar menggunakan sistem irigasi sehingga memungkinkan terjadinya infiltrasi dan perkolasi larutan nutrien menuju area tanah yang tercemar tersebut. Pada saat yang oksigen dipompakan atau diisap ke area tersebut.

Gambar 2.2 berikut menunjukkan ilustrasi berbagai teknik optimasi yang telah diuraikan di atas.



Gambar 2.2 Ilustrasi upaya optimasi dalam bioremediasi
(Ket: (A): Biopile; (B): Landfarming; (C): Windrow dan Bioventing)

- c. Mikroorganisme; pemanfaatan mikroorganisme, khususnya bakteri, dalam bioremediasi merupakan salah satu upaya untuk optimasi agar proses pengolahan dapat berjalan dengan lebih cepat dalam mencapai *end point criteria* yang telah ditetapkan. Pada prinsipnya terdapat 2 (dua) pendekatan yaitu:
 - *Biostimulation*; Pendekatan ini adalah upaya pemanfaatan bakteri yang sudah ada dalam tanah tercemar (*Indigenous*) dalam melakukan biodegradasi kontaminan dengan cara menyediakan kebutuhan nutrien dan kondisi lingkungan yang dapat mendukung bakteri ini

memanfaatkan pencemar sebagai sumber karbon dan sumber energi untuk tumbuh secara optimal. Pengaturan komposisi C:N:P dipertahankan secara kontinu melalui penambahan N dan P pada selang waktu tertentu. Selain itu pula, faktor-faktor lingkungan seperti kandungan air (*water content*) dijaga dalam kisaran 10-20% melalui sistem pengairan/irigasi/penyiraman secara rutin dan pH tanah melalui penambahan kapur atau *dolomite* agar terus terjaga dalam pH cenderung netral karena proses biodegradasi tanah tercemar hidrokarbon pada umumnya akan mengakibatkan terjadinya penurunan pH.

- *Bioaugmentation*; metode ini pada dasarnya adalah proses penambahan bakteri ke dalam tanah tercemar dengan tujuan untuk menambah jumlah bakteri yang ada di dalam sistem secara cepat. Pada saat yang sama, penambahan bakteri ini diharapkan akan mempercepat proses degradasi kontaminan karena bakteri yang ditambahkan merupakan bakteri yang sudah terbukti memanfaatkan kontaminan yang menjadi target sebagai sumber karbon dan sumber energi untuk pertumbuhannya (*augmented bacteria*).

2.2 Remediasi Fisik-Kimia

Tabel 1.3 berikut menunjukkan berbagai teknologi remediasi yang berdasarkan pendekatan proses fisik-kimia baik secara *in-situ* maupun *ex-situ*. Prinsip dasar dari pendekatan teknologi ini adalah proses pengolahan yang akan melibatkan fenomena fisika dan sifat fisik dari kontaminan seperti proses volatilisasi secara fisik, desorpsi maupun adsorpsi dan lain-lain. Dalam pendekatan ini dimungkinkan terjadinya penambahan substansi kimia agar terjadi proses-proses kimia sebagai lanjutan dari proses fisik yang sudah diaplikasikan seperti oksidasi absorpsi, solubilisasi, dan lain-lain.

Secara konseptual, fenomena fisika yang diaplikasikan dalam proses remediasi terklasifikasi sebagai remediasi dengan cara immobilisasi dan juga ekstraksi apabila memungkinkan. Sebaliknya, untuk pengolahan kimia, maka remediasi yang paling dominan adalah remediasi ekstraksi dan destruksi. Sehingga, kombinasi pengolahan fisik-kimia secara simultan akan meningkatkan keberhasilan proses pemulihan fungsi lingkungan hidup melalui berbagai pendekatan Teknik remediasi.

Tabel 2.2 Teknologi Remediasi Fisik-Kimia

Tanah dan Lumpur	Air Tanah
<i>In Situ Physical/Chemical Treatment</i> • <i>Chemical Oxidation</i> • <i>Electrokinetic Separation</i> • <i>Fracturing</i> • <i>Soil Flushing</i> • <i>Soil Vapor Extraction</i> • <i>Solidification/Stabilization</i> <i>Ex Situ Physical/Chemical Treatment (Assuming Excavation)</i> • <i>Chemical Extraction</i> • <i>Chemical Reduction/Oxidation</i> • <i>Dehalogenation</i> • <i>Separation</i> • <i>Soil Washing</i> • <i>Solidification/Stabilization</i>	<i>In Situ Physical/Chemical Treatment</i> • <i>Air Sparging</i> • <i>Bioslurping</i> • <i>Chemical Oxidation</i> • <i>Directional Wells</i> • <i>Dual Phase Extraction</i> • <i>Hydrofracturing Enhancements</i> • <i>In-Well Air Stripping</i> • <i>Passive/Reactive Treatment Walls</i> <i>Ex Situ Physical/Chemical Treatment (assuming pumping)</i> • <i>Adsorption/Absorption</i> • <i>Advanced Oxidation Processes</i> • <i>Air Stripping</i> • <i>Granulated Activated Carbon (GAC)/Liquid Phase Carbon Adsorption</i> • <i>Ground Water Pumping/Pump and Treat</i> • <i>Ion Exchange</i> • <i>Precipitation/Coagulation/Flocculation</i> • <i>Separation</i> • <i>Sprinkler Irrigation</i>

2.3 Thermal

Thermal Treatment hanya dapat diaplikasikan untuk tanah tercemar dan kecil kemungkinan dapat diaplikasikan untuk air tanah. *Thermal treatment* dalam remediasi lingkungan berorientasi pada pendekatan *extraction remediation*. Sehingga meskipun pendekatan destruksi seperti halnya *Incineration* termasuk dalam kategori *thermal treatment*, pemanfaatannya dilakukan seminimal mungkin agar fungsi tanah tidak terganggu akibat dari paparan termal dalam proses. Kesuburan tanah dan struktur tanah diupayakan dipertahankan seperti semula dan sesuai dengan tujuan dilakukannya remediasi lingkungan yaitu mengembalikan fungsi lingkungan hidup. Beberapa Teknik Remediasi dengan pendekatan termal antara lain adalah:

- *In-situ Thermal Treatment*
- *Hot Gas Decontamination*
- *Incineration*
- *Open Burn/Open Detonation*
- *Pyrolysis*
- *Thermal Desorption*
- *Landfill Cap*

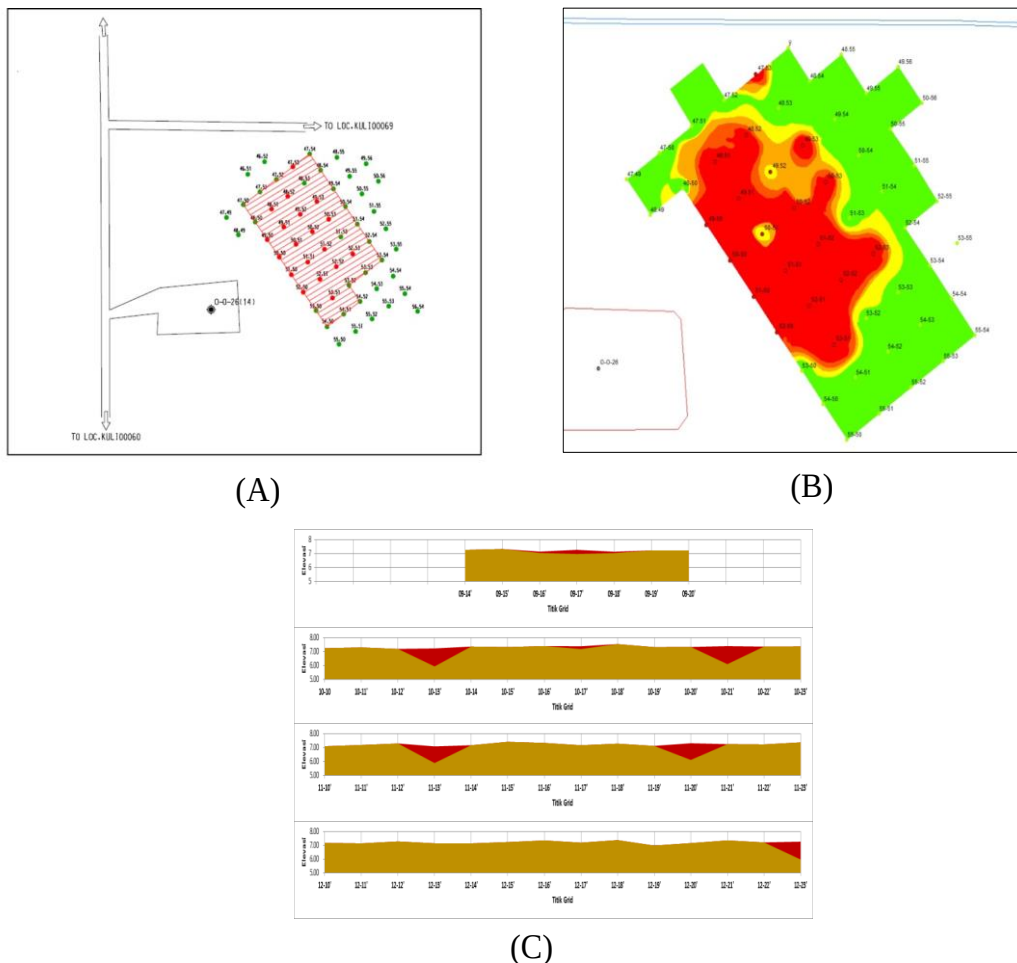
3 TAHAPAN DALAM APLIKASI TEKNOLOGI REMEDIASI

Untuk menjamin keberhasilan dari implementasi proses remediasi, maka beberapa tahapan perlu dilakukan. Sehingga, pilihan teknologi pengolahan yang akan diterapkan akan sesuai dengan kebutuhan dan kondisi di lapangan. Tahapan-tahapan tersebut adalah:

- Karakterisasi lokasi (*site-characterization*); Beberapa hal yang perlu dilakukan pada tahapan ini antara lain adalah identifikasi penyebaran kontaminan, latar belakang & sejarah lokasi/tapak, serta transformasi awal pencemar yang sudah terjadi. Penelusuran dapat dilakukan melalui pengumpulan data sekunder dan data primer (melakukan pengukuran di lapangan untuk deliniasi sebaran pencemar secara vertikal maupun horizontal dan juga karakteristik fisik tanah yang akan dipulihkan). Tujuan akhir dari tahapan ini adalah untuk melihat kelayakan (*feasibility*) dari implementasi proses remediasi. Tahapan ini merupakan awal dari proses penapisan pilihan teknologi remediasi yang akan diaplikasikan (*eks-situ* atau *in-situ*).
 - Karakterisasi Media Terkontaminasi:
 - Fisik: *Particle Size Distribution* (PSD), kandungan air, *bulk density*, *soil permeability*, *soil porosity* dan sifat fisik lainnya yang akan berpengaruh terhadap pergerakan air dan udara dalam tanah.
 - Kimia: pH, *humic acid content*, *Oxidation Reduction Potential*, Kow (*coefficient octanol-water*), kapasitas tukar kation (KTK) dan faktor kimia lainnya yang akan mempengaruhi reaksi-reaksi kimia yang akan terjadi.
 - Biologi: enumerasi bakteri, ketersediaan *electron acceptor*, kehadiran nutrisi, dan faktor biologi lainnya.
 - Sifat/kategori kontaminan:
 - *Volatile organic compounds*
 - *Semi-volatile organic compounds*
 - *pesticides and herbicides*
 - *PCBs*
 - *Metals*
 - *Cyanide*
 - *Hydrocarbon*

Berbagai teknologi deteksi kontaminan yang berkembang saat ini akan sangat menentukan luasan dan besaran/volume pencemaran di mana hal ini

akan menjadi salah satu faktor penentu dalam penetapan teknologi remediasi yang akan diaplikasikan. Di antara teknologi deteksi yang saat ini sering digunakan adalah dengan sistem pengeboran/*coring*, geolistrik, deteksi kehadiran CO₂, pemanfaatan drone dengan resolusi tinggi dan LiDAR dan lain sebagainya. Hal ini menjadi sangat penting karena biaya pengolahan merupakan fungsi dari volume limbah yang akan diolah, termasuk di dalamnya tanah tercemar. Gambar 2.3 berikut menunjukkan hasil delineasi tanah terkontaminasi minyak bumi dengan pendekatan *coring*.



Gambar 2.3 Delineasi Tanah Terkontaminasi
(A): Titik Pengambilan Sampel; (B) Sebaran Horizontal; (C) Sebaran Vertikal

- *Treatability Study* (Uji Keterolahan); tahapan ini dilakukan di laboratorium untuk memastikan tingkat *degradability* dari kontaminan/pencemar. Pada tahapan ini dilakukan berbagai uji laboratorium di antaranya adalah

kinetika pertumbuhan bakteri yang terlibat dalam proses bioremediasi, uji toksisitas tanah sebelum diolah dan hasil olahannya, analisis terhadap metabolit produk, berbagai teknik remediasi yang mungkin dilakukan, dan lain lain. Pada tahap ini pula penerapan proses *bio-stimulation* dan *bio-augmentation* dapat diuji apabila bioremediasi menjadi pilihan utama. Demikian halnya kemungkinan reaksi-reaksi kimia dan biokimia yang terjadi dapat diprediksi pada tahap ini. Sehingga, pada aplikasi skala lapangan sudah dapat diputuskan teknik mana yang terbaik untuk memulihkan tanah tercemar tersebut. Sama halnya dengan tahapan *site characterization*, tahapan *treatability* hanya dilakukan pada saat awal inisiasi proses remediasi. *Treatability study* perlu dilakukan kembali apabila terjadi perubahan yang mendasar terhadap karakteristik lokasi/tapak dimana termasuk di dalamnya terjadi perubahan jenis dan komposisi kontaminan/pencemar maupun karakteristik fisik dari tanah tercemar.

- *Pilot Study*; tahap ini bertujuan untuk melakukan *scaling up* dari *treatability study* yang masih dilakukan dalam *laboratory scale*. Proses ini menjadi penting sebelum aplikasi skala lapangan (*full scale*) karena merupakan miniatur dari proses remediasi yang akan diaplikasikan. Pada tahap *treatability study*, sebagian besar parameter penentu keberhasilan remediasi dikendalikan secara penuh. Namun, pada tahap *pilot scale* beberapa parameter akan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (misalnya temperatur). Sehingga, diharapkan tahap ini merupakan representasi dari aplikasi skala lapangan. Parameter yang dikelola selama *pilot study* ini adalah seluruh parameter fisik, kimia, dan lingkungan yang akan memengaruhi keberhasilan proses remediasi.

Dalam skala lapangan (*scale up*), terdapat paling tidak 4 tahapan penting, yaitu:

- *Site Preparation and Staging*; beberapa hal yang harus dilakukan pada tahap ini antara lain adalah pembebasan lahan dan atau sewa pakai lahan terkontaminasi, apabila lahan tersebut merupakan kepemilikan pihak lain dan pembersihan lahan termasuk pembukaan jalan akses apabila diperlukan. Apabila remediasi akan dilaksanakan secara *in-situ*, maka diperlukan pematangan lahan untuk menempatkan peralatan remediasi yang diperlukan. Pengerukan (ekskavasi) yang disertai dengan penyiapan tanah segar pengganti (*dug and fill*) merupakan bagian penting pada tahap ini apabila pengolahan akan dilakukan secara *ex-situ*. Sehingga, baik pada

secara *in-situ* maupun *ex-situ* akan melibatkan aktivitas alat-alat berat yang memerlukan pengelolaan transportasi secara khusus agar tidak mengganggu lingkungan setempat.

- *Pre-Treatment*: Apabila tanah olahan akan mendapatkan perlakuan remediasi secara *ex-situ* di mana terjadi proses pengerukan, maka untuk meningkatkan kinerja dari proses remediasi yang akan diaplikasikan, diperlukan proses pra-pengolahan tanah tersebut. Proses-proses yang terjadi tersebut antara lain adalah pemisahan padatan tanah yang *oversize* seperti batu atau kerikil, penggerusan dan pencacahan (*grinding* dan *milling*) apabila tanah tercemar membentuk bongkahan atau beraglomerasi satu sama lain dan termasuk di dalamnya adalah klasifikasi konsentrasi pencemar (misalnya dari dibedakan antara tanah tercemar konsentrasi rendah, sedang dan tinggi) disesuaikan dengan spesifikasi teknis proses remediasi yang akan diaplikasikan.
- *Treatment*; tahap ini merupakan tahap utama dari proses pemulihan tanah tercemar. Pilihan teknologi remediasi yang digunakan didasarkan pada hasil *site characterization* dan *treatability study*. Apabila remediasi dilakukan secara *in-situ*, maka akan diperlukan lahan yang dapat mengakomodasi penempatan peralatan yang melibatkan serta ketersediaan sumber daya energi. Selain sumber daya energi, pada pendekatan *ex-situ* di mana kontrol terhadap proses relatif lebih mudah dilakukan, maka akan diperlukan lahan selain untuk peralatan remediasi, juga untuk penempatan tanah olahan, prapengolahan tanah olahan dan tanah hasil terolah.
- *Post-Treatment/Residuals Management*; proses pengolahan akan menghasilkan tanah hasil olahan (tanah terolah), *oversize materials* hasil *pre-treatment* dan kemungkinan terbentuk lumpur/*sludge/slurry* apabila dalam proses pengolahannya melibatkan pengadukan/*mixing*, penambahan air ataupun termal, seperti misalnya teknik *soil washing* ataupun *off-gas* yang terbentuk sebagai akibat dari volatilisasi pencemar dan atau produk dari proses pengolahan. Sehingga, residuals material ini memerlukan penanganan secara khusus misalnya dengan pengolahan lumpur/*sludge treatment* (seperti *filter press* atau *belt press*) maupun alat pengendali pencemaran udara/*air pollution control* (seperti misalnya *adsorber*, *catalytic converter* ataupun *wet scrubber*). Demikian halnya dengan air yang terproduksi dari proses pengolahan akan memerlukan

pengolahan yang dapat berupa tangka pengendap, filtrasi maupun pendekatan pengolahan fisik-kimia seperti adsorpsi.

4 REMEDIASI FISIK-KIMIA UNTUK PENINGKATAN *POLLUTANTS BIOAVAILABILITY*

Seperti telah diuraikan sebelumnya bahwa remediasi secara biologi akan selalu menjadi pilihan utama dalam pemulihan lahan apabila faktor-faktor teknis yang ada memungkinkan untuk dilakukan bioremediasi, seperti waktu, biaya dan ketersediaan lahan. Salah satu faktor pembatas yang dapat menurunkan efektivitas dari bioremediasi adalah *pollutants bioavailability* atau ketersediaan polutan secara biologi yang memungkinkan pencemar tersebut secara mudah masuk ke dalam sel bakteri untuk kemudian didegradasi melalui metabolisme yang terjadi di dalam sel.

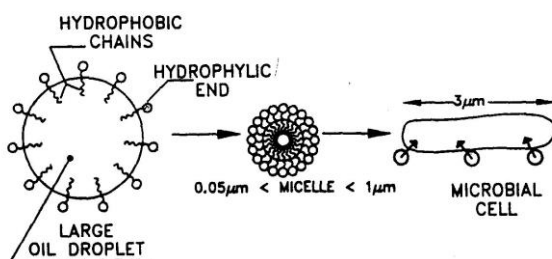
Beberapa upaya yang dapat meningkatkan *bioavailability* ini dapat dilakukan melalui pendekatan pengolahan pendahuluan secara fisik-kimia sehingga memungkinkan pencemar akan mengalami perubahan karakteristik fisik dan kimia sehingga akan memudahkan proses pengambilan dan degradasi pencemar oleh bakteri. Meningkatkan kelarutan pencemar dalam air/pelarut melalui penambahan surfaktan adalah salah satu contoh yang dapat memudahkan bakteri untuk melakukan *uptake* pencemar. Selain itu, penambahan *oxidizing agent* ataupun katalis dapat membantu dalam penyederhaan pencemar untuk menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga menjadi lebih *biodegradable*. Berikut adalah beberapa kajian dan penelitian yang terkait.

4.1 Aplikasi *Surfactants*

Beberapa hasil studi yang telah dipublikasikan menunjukkan bahwa surfaktan dapat meningkatkan laju bioremediasi (Rodrigues *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2008; Zhang dan Zhu, 2014). Sejauh ini mekanisme terjadinya peningkatan laju degradasi belum sepenuhnya dipahami dengan baik, namun studi-studi tersebut menunjukkan bahwa ada kisaran konsentrasi surfaktan di mana surfaktan dapat meningkatkan aktivitas mikroba dan dengan demikian meningkatkan proses mineralisasi senyawa hidrokarbon, khususnya dalam kaitannya dengan bioremediasi tanah tercemar minyak bumi yang diukur oleh kehadiran *Total Petroleum Hydrocarbon* (TPH). Penambahan surfaktan

berpotensi meningkatkan bioavailabilitas hidrokarbon atau mengubah karakteristik tanah (misalnya, hidrofobisitas), sehingga meningkatkan laju bioremediasi pada tanah yang terkontaminasi minyak bumi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1.

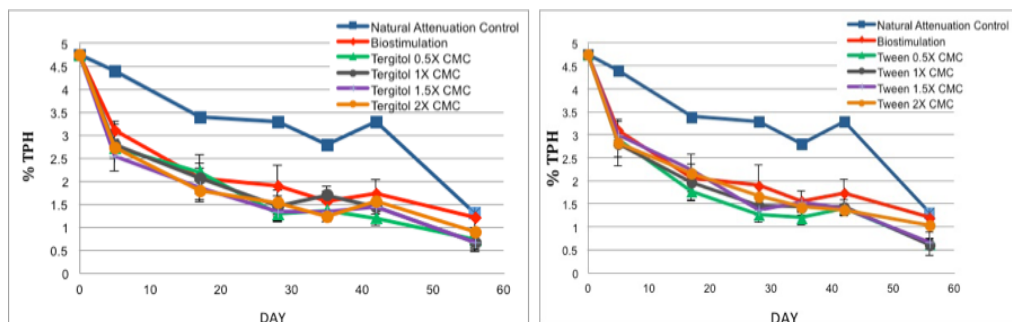
Konsentrasi misel kritis atau *critical micelle concentration* (CMC) didefinisikan sebagai konsentrasi minimum surfaktan agar supaya misel terbentuk dalam larutan. Pada konsentrasi rendah yang jauh di bawah CMC, surfaktan mungkin tidak memiliki berpengaruh terhadap kelarutan hidrokarbon dan/atau pembasahan tanah sehingga tidak akan mempengaruhi laju degradasi TPH. Sebaliknya, pada konsentrasi yang terlalu tinggi, diketahui beberapa jenis surfaktan dapat menjadi toksik bagi mikroba dan menghambat aktivitas mikroba (Rodrigues *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2008) yang berpotensi menghambat laju degradasi hidrokarbon. Dengan mengoptimalkan konsentrasi surfaktan, dimungkinkan untuk meningkatkan laju biodegradasi sehingga akan menghasilkan siklus proses bioremediasi menjadi yang lebih singkat.



Gambar 4.1 Mekanisme Peningkatan Bioavailability dengan Penambahan Surfactant

Penurunan konsentrasi TPH untuk tanah tercemar dengan penambahan surfaktan dalam beberapa minggu pertama lebih tinggi apabila dibandingkan dengan reaktor kontrol seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan surfaktan telah meningkatkan tingkat biodegradasi TPH dan/atau mengurangi waktu yang dibutuhkan oleh komunitas mikroba untuk mulai mendegradasi TPH. Dalam studi ini, terlihat adanya percepatan laju degradasi TPH untuk mencapai 1% TPH apabila dibandingkan dengan reaktor kontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan surfaktan akan meningkatkan tingkat penyisihan TPH menggunakan surfaktan. Baik Tween dan Tergitol merupakan surfaktan yang dapat terurai secara alamiah dan telah terbukti sebagai substrat pertumbuhan yang baik untuk mikroorganisme tanah (Bautista *et al.*, 2009; Gonzalez *et al.*,

2011). Penambahan surfaktan ini terbukti tidak ada dampak yang signifikan terhadap jumlah populasi mikroba dan kualitas tanah (pH dan EC), sehingga penambahan surfaktan pada dosis tertentu dapat menjadi metode yang menarik untuk meningkatkan kinerja bioremediasi dalam skala lapangan, baik terkait peningkatan laju penyisihan TPH maupun terhadap waktu pengolahan yang lebih singkat.



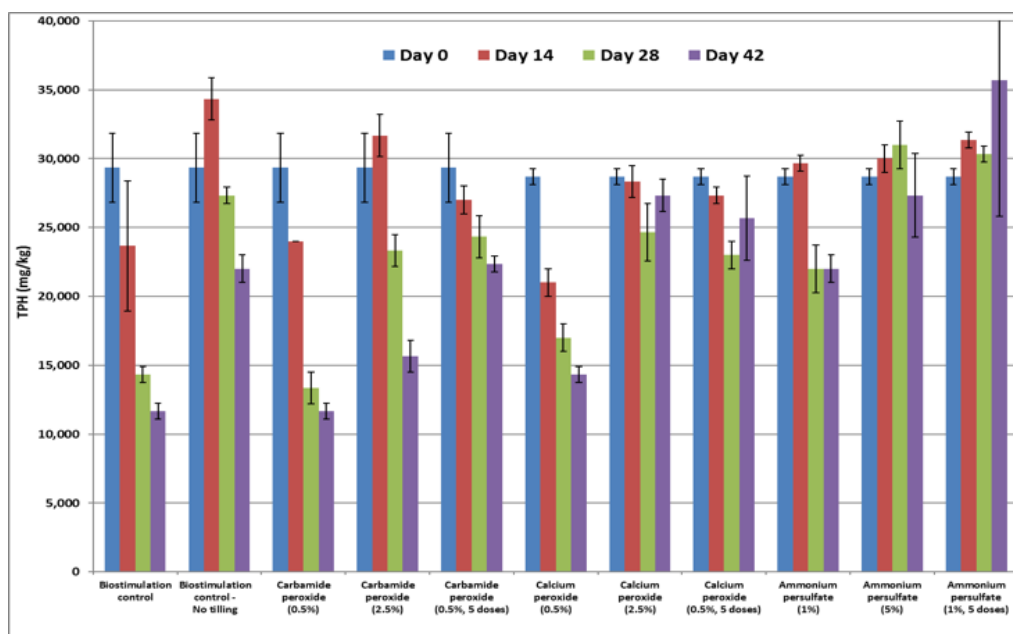
Gambar 4.2 Penambahan Surfaktan terhadap Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi

4.2 Penambahan *Oxidizing Agents*

Pendekatan dengan proses oksidasi kimia telah banyak digunakan selama beberapa dekade untuk mengolah dengan cepat berbagai macam hidrokarbon di tanah dan air tanah di lokasi yang terkena dampak tumpahan solar, minyak mentah, bahan bakar minyak, dan lain-lain (Gong, 2012; Koolivand *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015; Xu *et al.*, 2011; Yen *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2016). Oksidan melepaskan radikal bebas yang memiliki potensi oksidasi tinggi dalam mengoksidasi hidrokarbon dan memutus cincin aromatik. Beberapa jenis oksidator yang banyak digunakan antara lain adalah ozon, hidrogen peroksida, dan natrium persulfat. Proses oksidasi kimia penuh (complete) akan menghasilkan karbon dioksida dan air, sedangkan oksidasi kimia parsial hidrokarbon dapat menghasilkan pembentukan produk sampingan senyawa polar yang lebih rentan terhadap biodegradasi. Sehingga, pengolahan tanah yang terkontaminasi hidrokarbon dengan penambahan oksidator yang memiliki potensial oksidasi yang rendah dapat mengoksidasi sebagian hidrokarbon dan membuatnya lebih mudah terurai secara biologi. Hal ini berpotensi meningkatkan laju dan/atau tingkat biodegradasi tanah yang terkontaminasi minyak mentah.

Namun, penambahan oksidator ini akan menimbulkan sejumlah permasalahan. Hidrogen Peroksida dapat mengalami dekomposisi secara spontan dan akan segera beraksi dengan bahan organik alami (Sutton *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2015) dan/atau mineral tereduksi di dalam tanah. Oleh karena itu, reaktivitas peroksida di tanah dapat berumur sangat pendek (menit hingga jam). Selain itu, beberapa jenis oksidator diketahui berdampak pada pH tanah dan konduktivitas listrik. Sehingga, oksidator yang ditambahkan ke dalam tanah harus dibatasi karena pengaruhnya terhadap kualitas tanah cukup signifikan. Konsentrasi oksidator yang terlalu tinggi kemungkinan juga akan mensterilkan tanah sehingga dapat menghambat atau memperlambat pertumbuhan mikroba.

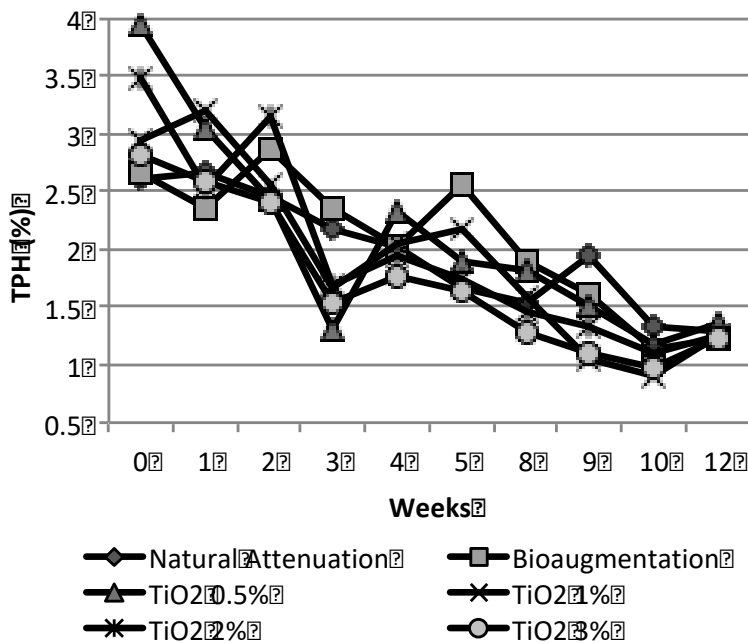
Pengaruh penambahan oksidator pada proses bioremediasi dalam studi yang dilakukan oleh penulis dan kawan-kawan, dapat dilihat pada Gambar 4.3. Secara umum, studi ini menunjukkan bahwa tidak ada manfaat menambahkan hidrogen peroksida, karbamid peroksida, kalsium peroksida atau amonium persulfat pada contoh tanah terkontaminasi minyak bumi yang digunakan. Penurunan konsentrasi TPH dalam dengan penambahan karbamid peroksida 1% b/b tidak berbeda dengan reaktor kontrol. Namun, ketika karbamid peroksid pada konsentrasi yang lebih tinggi (2,5%), jumlah nitrogen (~7.500 mg-N/kg) ditambahkan ke dalam sistem besar kemungkinan menghambat aktivitas mikroba, sehingga menyebabkan penyisihan TPH lebih rendah daripada reaktor kontrol. Ini menguatkan studi sebelumnya yang telah menunjukkan bahwa nitrogen yang berlebihan dapat memengaruhi aktivitas mikroba (McMillen *et al.*, 2004). Demikian halnya dengan dampak penambahan oksidator perkarbonat yang hanya mampu meningkatkan laju degradasi dalam beberapa minggu pertama. Namun, dalam jangka panjang (6 – 16 minggu), tidak ada dampak yang terlihat pada tingkat biodegradasi dibandingkan dengan reaktor kontrol. Secara keseluruhan, tampaknya tingkat oksidan yang ditambahkan ke tanah ini tidak dapat meningkatkan laju atau tingkat bioremediasi. Sementara studi-studi sebelumnya yang dipublikasikan mencatat dampak signifikan penambahan oksidator terhadap laju dan/atau tingkat bioremediasi solar, bahan bakar minyak, bensin, minyak ringan, dan lain-lain. Ada kemungkinan bahwa karakteristik tanah (misalnya kandungan bahan organik tanah yang tinggi) dan komposisi minyak yang diuji dalam studi ini mempengaruhi kinerja oksidator.



Gambar 4.3 Penambahan Oksidator dalam Bioremediasi Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi

4.3 Penambahan Katalis

Biodegradabilitas dan kelarutan kontaminan dapat meningkat setelah terjadi oksidasi terhadap kontaminan tersebut, seperti misalnya oksidasi fotokatalitik (Brame dkk., 2013). Untuk hidrokarbon fraksi berat, auto-, termal- atau fotooksidasi dapat digabungkan dengan biodegradasi karena ketiga mekanisme oksidasi ini dapat mengoksidasi hidrokarbon secara partial terutama yang teradsorpsi di permukaan tanah yang akan meningkatkan kelarutannya dalam air, sehingga akan meningkatkan bioavailabilitasnya (Bossert & Compeau., 1995). Peningkatan biodegradabilitas dan kelarutan dapat dilakukan dengan menggabungkan antara TiO_2 fotokatalitik dan biodegradasi. Hal ini akan mengatasi keterbatasan bioavailabilitas hidrokarbon untuk mikrob dan berpotensi meningkatkan laju penyisihan TPH dalam bioremediasi tanah yang terkontaminasi minyak mentah dengan menggunakan teknik *landfarming*.



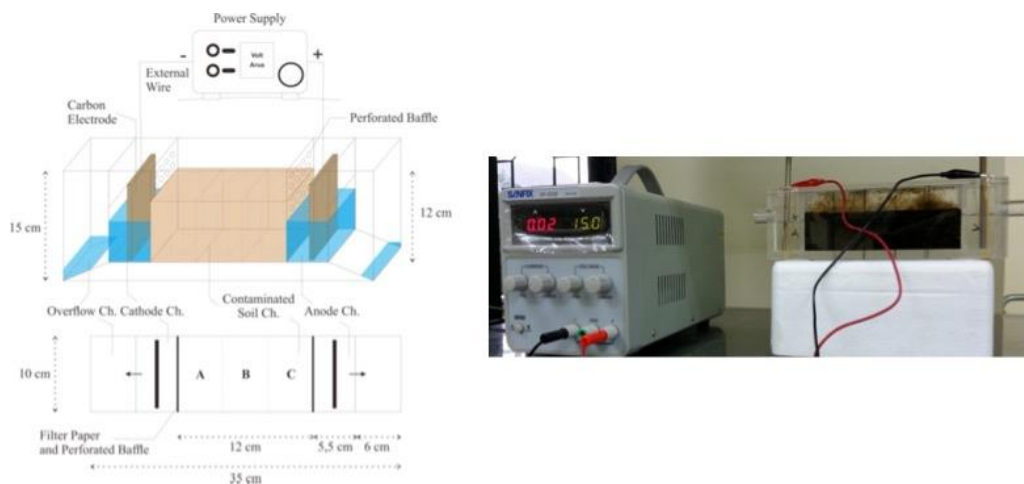
Gambar 4.4 Penambahan TiO₂ ntuk Meningkatkan Bioavailability

Berdasarkan hasil studi yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 menunjukkan kemungkinan penggabungan antara fotokatalitik TiO₂ di bawah iradiasi sinar matahari dengan biodegradasi untuk meningkatkan degradasi TPH dalam bioremediasi tanah yang terkontaminasi minyak mentah dengan menggunakan teknik *landfarming*. Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan fotokatalis mampu meningkatkan tingkat penyisihan TPH dibandingkan dengan biostimulasi saja. Namun, peningkatan laju degradasi tidak selalu sebanding dengan peningkatan konsentrasi TiO₂. Proses degradasi dipengaruhi oleh aktivitas mikroba *indigenous* dan energi yang berasal dari sinar UV, tetapi tidak dipengaruhi secara signifikan oleh intensitas UV. Laju degradasi TPH tertinggi didapatkan pada bioremediasi tanah minyak bumi dengan penambahan konsentrasi TiO₂ sebesar 2%.

4.4 Teknologi *Electrokinetic Remediation* (ER)

Elektrokinetik didefinisikan sebagai pergerakan beban fisikokimia, pergerakan partikel bermuatan dan efek dari potensi listrik pada pembentukan dan pergerakan fluida dalam media berpori. Elektrokinetik menggunakan arus searah (DC) atau listrik beda potensial rendah ke susunan elektroda yang ditempatkan di tanah, untuk menghilangkan partikel logam organik dan anorganik (Mosavat dkk, 2012). Remediasi elektrokinetik adalah

pergerakan air (*electroosmosis*), ion-ion dan molekul kutub (elektromigrasi) dan partikel padat (elektroporesis) yang berhubungan satu dengan yang lainnya di antara dua elektroda di bawah arus (DC) dalam suatu medan listrik. Ketika arus DC masuk ke tanah, cairan akan bergerak menuju elektroda negatif (katoda) karena adanya reaksi elektroosmosis. Hal ini mengakibatkan perpindahan ion. Kation dengan muatan positif berpindah menuju katoda. Sementara anion dengan muatan negatif menuju anoda. Pada proses elektrokimia tidak bergantung pada ukuran pori-pori tanah sehingga dapat digunakan tanah kasar dan tanah yang berbutir halus. Jika terdapat jenis logam yang terdapat di dalam larutan pori tidak bermuatan, maka pada kasus ini tidak dapat menggunakan elektrokimia untuk menghilangkan kandungan logam berat yang ada di dalam tanah. Pada beberapa kasus *electroosmotic Flushing* dapat digunakan untuk tanah yang berbutir halus (Acar dan Alshawabkeh, 1993). Gambar berikut menunjukkan konfigurasi *Electrokinetic Remediation* (ER) dalam skala laboratorium.



Gambar 4.5 Konfigurasi Electrokinetic Remediation (ER)

Berdasarkan hasil analisis Gas *Chromatography–Mass Spectrophotometer* (GC-MS) seperti yang ditampilkan pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa spesies hidrokarbon yang ada di tanah yang terkontaminasi minyak bumi yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan oleh Effendi dkk. (2022), didominasi oleh senyawa aromatik. Namun, senyawa alifatik, yaitu *phytane*/C₂₀ sebagai bioindikator ditemukan dalam konsentrasi yang sangat tinggi. *Phytane* dikategorikan sebagai senyawa *non-biodegradable* dan persisten yang biasanya hadir dalam minyak bumi. Speight dan Arjoon (2012)

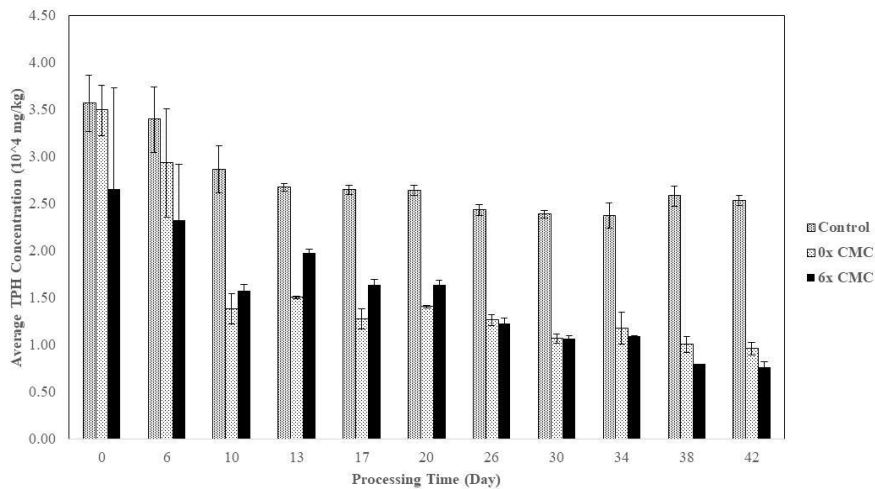
menyatakan bahwa tahap awal biodegradasi (selain efek penguapan) ditandai dengan hilangnya n-parafin (n-alkana atau alkana bercabang) diikuti dengan hilangnya isoprenoid asiklik (misalnya senyawa *non-pristane*, *pristane*, dan *phytane*). Kelimpahan senyawa aromatik di tanah yang terkontaminasi minyak bumi ini menunjukkan kehadiran kontaminan yang terkategori *less-biodegradable*. Hasil GC-MS setelah tanah terkontaminasi diolah dengan remediasi elektrokinetik di reaktor dengan penambahan surfactant pada konsentrasi 6x CMC (*critical micelle concentration*), menunjukkan bahwa telah terjadi penurunan *phytane* dengan sangat signifikan dan terurainya sebagian senyawa aromatik. Hal ini menunjukkan bahwa *bioavailability* dari tanah tercemar kontaminan tersebut telah meningkat. Selain mekanisme elektromigrasi, elektroosmosis, dan elektroforesis, proses oksidasi juga terjadi di sekitar elektroda akibat proses transfer elektron. Munculnya *derivate* dari senyawa aromatik kemungkinan besar disebabkan oleh mekanisme oksidasi.

Tabel 4.1 Hasil GC-MS Sebelum dan Setelah Aplikasi ER

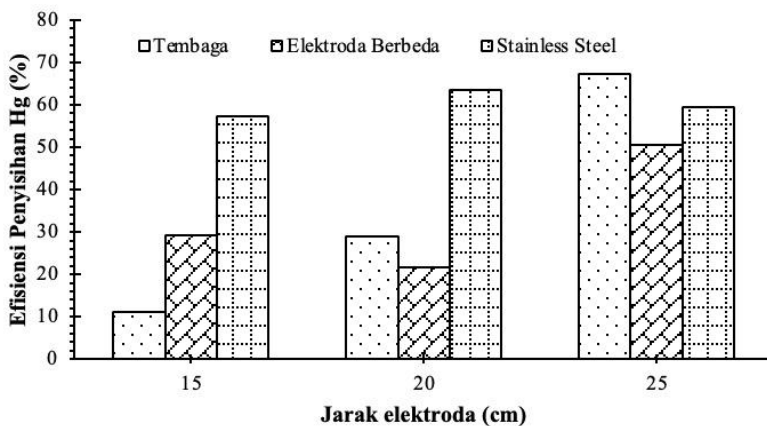
No	Name	MW (g/mol)	Formula	Area (Unit)	
				Before	After
1	Furan, tetrahydro-2,5-dimethyl-	100.161	C ₆ H ₁₂ O	302,096	467,763
2	TETRAPENTACOSAN	759.474	C ₅₄ H ₁₁₀	761,507	347,035
3	Hexadecane,2,6,10,14-tetramethyl-(CAS) Phytane	282.55	C ₂₀ H ₄₂	2,486,168	612,152
4	Cholest-23-ene, (5.beta.)-	370	C ₂₇ H ₄₆	594,188	650,657
5	Naphthalene, 1,6-dimethyl-4-(1-methylethyl)- (CAS) Cadalin	198.309	C ₁₅ H ₁₈	490,950	641,268
6	Cyclotetrasiloxane, octamethyl-(CAS) 1,1,3,3,5,5,7,7-OCTAMETHYL-CYCLOOCTASILOXANE	296.616	C ₈ H ₂₄ O ₄	227,733	
7	2-O-methylbaeomycesic acid	388	C ₂₀ H ₂₀ O ₈	133,801	
8	Cyclobuta[1,2:3,4]dicyclooctene, hexadecahydro-, (6a.alpha.,6b.alpha.,12a.alpha.,12b.alpha.)-(CAS) TRICYCLO[8.6.0.0(2,9)]HEXA	220.4	C ₁₆ H ₂₈	154,595	
9	1,2-Benzenedicarboxylic acid, butyl cyclohexyl ester	304.386	C ₁₈ H ₂₄ O ₄	300,578	
10	Cyclotrisiloxane, hexamethyl-(CAS) 1,1,3,3,5,5-HEXAMETHYL-CYCLOHEXASILOXANE	222.462	C ₆ H ₁₈ O ₃ Si ₃	268,375	
6	Amorphane-A	208.389	C ₁₅ H ₂₈		865,706
7	Eicosane	282.5475	C ₂₀ H ₄₂		1,031,918
8	Pentadecane, 2,6,10,14-tetramethyl- (CAS) Pristane	268.529	C ₁₉ H ₄₀		370,807
9	Hexadecane (CAS) n-Hexadecane	226.44	C ₁₆ H ₃₄		612,152
10	Dotriacontane (CAS) n-Dotriacontane	450.88	C ₃₂ H ₆₆		240,663
11	14-.BETA.-H-PREGNA	288.511	C ₂₁ H ₃₆		700,591

Setelah *bioavailability* kontaminan telah ditingkatkan dengan menggunakan remediasi elektrokinetik sebagai pra-pengolahan, kemudian tanah hasil olahan ER tersebut diolah lebih lanjut menggunakan proses *landfarming*. Terlihat pada Gambar 4.6 bahwa setiap perlakuan terutama

dengan penambahan bakteri petrofilik (*bio-augmentation*), nutrisi, *bulking agent*, dan surfaktan terbukti memiliki perbedaan yang signifikan jika dibandingkan dengan reaktor tanpa perlakuan apa pun (kontrol). Hal ini menunjukkan bahwa selain penambahan unsur-unsur tersebut di atas, perlakuan *pre-treatment* dengan menggunakan Teknik *Electrokinetic Remediation* telah berhasil meningkatkan laju biodegradasi minyak bumi dalam tanah dengan bioremediasi *landfarming*.



Gambar 4.6 Penurunan TPH dalam Bioremediasi *Landfarming* setelah *ER Pre-Treatment*



Gambar 4.7 Migrasi Merkuri dengan Menggunakan ER

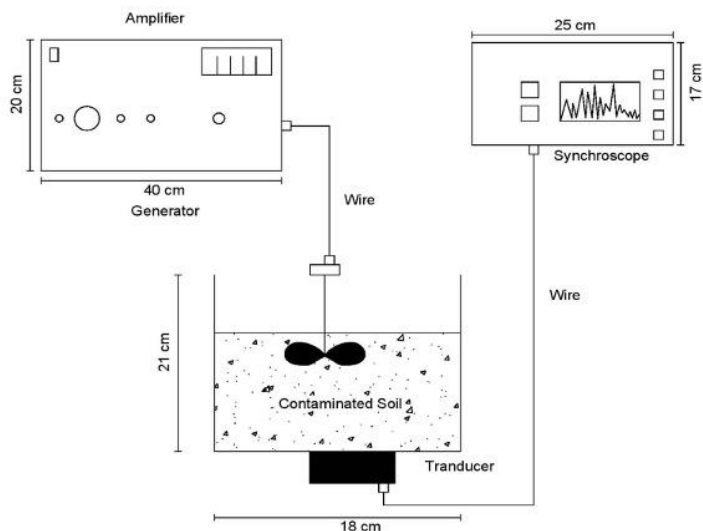
Aplikasi ER pada tanah terkontaminasi logam berat pun sangat potensial. Kajian dalam skala laboratorium yang hasilnya disajikan pada Gambar 4.7 terlihat bahwa telah terjadi proses migrasi merkuri ke arah katoda

dengan terakumulasi di katolit melalui mekanisme elektromigrasi, elektroforesis dan elektroosmosis di mana proses ini sangat dipengaruhi oleh jenis elektrolit, jenis elektroda, dan jarak antar elektroda. Mengingat logam berat terkategori sebagai pencemar konservatif, maka aplikasi ER untuk remediasi logam berat ini pada dasarnya terklasifikasi sebagai remediasi dengan prinsip ekstraksi.

4.5 Ultrasonic Remediation

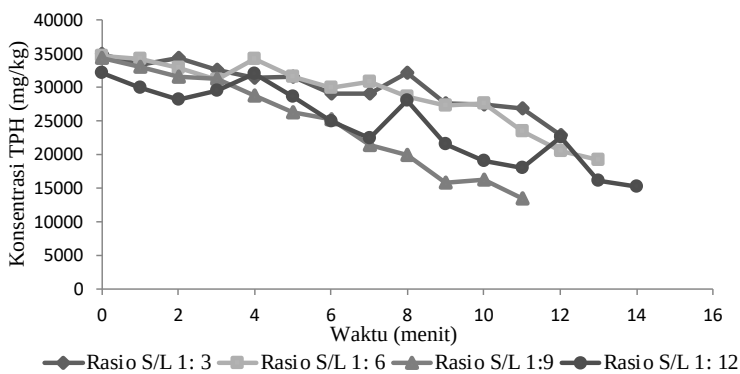
Ultrasonik adalah suara dengan frekuensi lebih besar dari 20 kHz (Wood dkk., 2017). Remediasi ultrasonik adalah teknologi baru yang dapat diaplikasikan untuk memulihkan tanah yang terkontaminasi. Terdapat 2 mekanisme utama yang terjadi pada proses ultrasonik yaitu desorpsi dan degradasi secara kimiawi. Ukuran partikel tanah, suhu, daya ultrasonik, frekuensi ultrasonik, intensitas ultrasonik dan waktu ultrasonik adalah beberapa faktor yang akan memengaruhi kinerja remediasi ultrasonik. Beberapa studi menunjukkan bahwa ultrasonik dapat ditempatkan sebagai proses prapengolahan (*pre-treatment*) dan terintegrasi dengan teknologi remediasi lainnya untuk meningkatkan efisiensi penyisihan, seperti misalnya digabungkan dengan *Electrokinetic Remediation* ataupun *Soil Washing*. Meskipun studi terkait dengan remediasi ultrasonik masih terbatas, ultrasonik ditemukan dapat menyisihkan kontaminan organik maupun anorganik, terutama logam berat dan tanah yang terkontaminasi hidrokarbon minyak bumi seperti yang ditunjukkan dalam beberapa studi terdahulu.

Umumnya, aplikasi ultrasonik sebagai teknik remediasi mengandalkan dua efek utama untuk menghilangkan bahan kimia dan kontaminan biologis dari tanah dan air. Yang pertama adalah mekanisme desorpsi yang dihasilkan oleh turbulensi dan yang kedua adalah degradasi (efek kimiawi) yang dihasilkan dari radikal bebas yang akan mengakibatkan terjadinya reaksi oksidasi. Tingkat keberhasilan metode ultrasonik ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis tanah, rasio tanah/air, laju aliran air, lama penyinaran, frekuensi gelombang, dan energi yang digunakan (Kim dan Wang, 2003; Feng dan Aldrich, 2000). Gambar berikut menunjukkan konfigurasi remediasi dengan memanfaatkan *ultrasonic* proses.



Gambar 4.8 Konfigurasi *Ultrasonic Remediation* Skala Laboratorium

Hasil penelitian oleh Marita & Effendi (2017) dan berdasarkan analisis statistik membuktikan bahwa waktu iradiasi ultrasonik, daya, dan rasio solid/liquid berpengaruh signifikan terhadap penyisihan kontaminan yang terkontaminasi minyak bumi yang dinyatakan sebagai TPH (*Total Petroleum Hydrocarbon*). Waktu optimum penurunan kontaminan hanya terjadi pada 15 menit awal. Efisiensi penyisihan TPH pada tanah dengan frekuensi 28 kHz dan 48 kHz adalah masing-masing sebesar 55,61 % dan 67,09 %. Melalui kajian ini dapat disimpulkan kondisi optimum terjadi pada frekuensi 48 kHz dalam kisaran waktu paparan selam 10-15 menit, dan pada daya o160 watt serta pada rasio *solid/liquid* (S/L) sebesar 1: 9 (gr/ml) seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4.9 Pengaruh Rasio S/L pada Penerapan *Ultrasonic Remediation*

Hasil analisis GC-MS yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut menunjukkan bahwa selain telah terjadi reduksi hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih sederhana dan bahkan telah terjadi mineralisasi yang ditunjukkan dengan tidak terdeteksi beberapa spesies hidrokarbon yang muncul pada saat sebelum ultrasonik diaplikasikan. Hal yang menarik lainnya adalah telah terjadinya penurunan konsentrasi senyawa *Pristane* (C19) dan *Phytane* (C20) sebagai indikator tingkat biodegradabilitas. Sehingga, melalui proses ultrasonik ini telah terjadi peningkatan *bioavailability* di mana proses lanjutan bioremediasi apabila diperlukan, dapat menurunkan lebih lanjut konsenrasi TPH yang terkandung dalam tanah terkontaminasi minyak bumi tersebut.

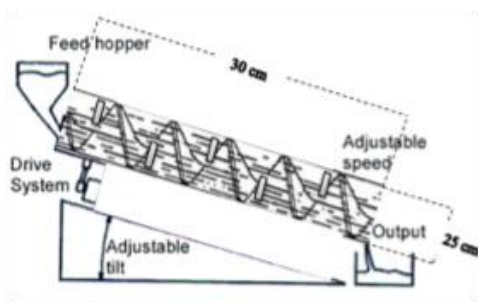
Tabel 4.2 Hasil GC-MS TPH Sebelum & Setelah Paparan Ultrasonik

No	Name	MW (g/mol)	Chemical Formula	Area	
				Before	After
1	Octadecane (CAS) n-Octadecane	254.50	<u>C₁₈H₃₈</u>	727121	ND
2	Pentadecane, 2,6,10,14-tetramethyl, Pristane	268.52	C¹⁹H⁴⁰	1076538	ND
3	Naphthalene, 1,6-dimethyl-4(1-methyl ethyl)	198.30	C ¹⁵ H ¹⁸	790076	ND
4	Pentadecane, 2,6,10,14-tetramethyl-(CAS), Pristane	268.59	C¹⁹H⁴⁰	6444314	1882465
5	Spiro (tetrahydrofury) 2.1 (decaline), 5'5'8'a-trimethyl	236.39	C ¹⁶ H ²⁸ O	876778	ND
6	Hexadecane 2,6,10,14-tetramethyl-(CAS)Phytane	282.54	C²⁰H⁴²	2030414	804983
7	Eicosane	282.54	C ²⁰ H ⁴²	624931	212481
8	Tetracosane (CAS) n-Tetracosane	338.66	<u>C₂₄H₅₀</u>	549140	241366
9	Triacontane	422.82	C ³⁰ H ⁶²	620986	285943
10	Tetratriacontane	478.93	C ³⁴ H ⁷⁰	560216	258507
11	Hexatriacontane	506.98	C ³⁶ H ⁷⁴	638633	ND
12	Dotriacontane (CAS) n-Dotriaconane	450.88	<u>C₃₂H₆₆</u>	689010	ND
13	Tetrapentacosan	759.47	C ⁵⁴ H ¹¹⁰	571738	ND
14	Tetrapentacontane	759.47	C ⁵⁴ H ¹¹⁰	556933	ND
15	HEXACONTANE	843.63	C ⁶⁰ H ¹²²	605474	ND

5 EKSTRAKSI KONTAMINAN DENGAN TEKNOLOGI SOIL WASHING

Ketika waktu pengolahan yang diperlukan dan karakteristik tanah menjadi perhatian utama dalam proses remediasi tanah yang terkontaminasi, terutama yang berkaitan dengan transfer massa dan bioavailabilitas polutan, maka mekanisme transfer polutan ke fase cair diharapkan dapat meningkatkan laju transfer massa serta bioavailabilitas polutan. Remediasi dengan *soil washing* (pencucian tanah) secara konseptual adalah desorpsi polutan yang terserap dari matriks tanah menjadi terlarut dan bergabung dengan pelarutnya dalam bentuk larutan atau seringkali disebut sebagai *washwater*. Karena jenis polutan dan karakteristik tanah yang bervariasi dan sangat spesifik terhadap lokasi, banyak tantangan yang harus dihadapi terutama di Indonesia yang secara geografis memiliki keunikan tersendiri. Kandungan asam humus (*humic acid*) yang tinggi dengan ukuran partikel tanah yang sangat halus merupakan salah satu contoh bahwa proses remediasi tanah tercemar di Indonesia memerlukan upaya yang lebih untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan kriteria yang ditetapkan.

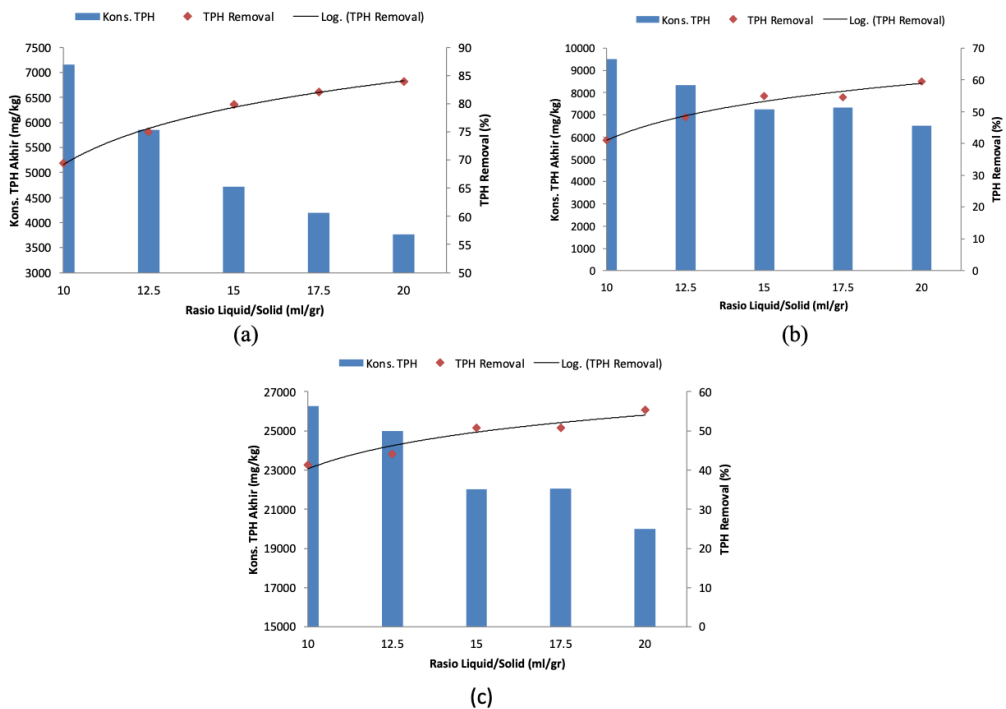
Mekanisme desorpsi dan solubilisasi merupakan dua faktor utama yang berperan penting dalam proses *soil washing*. Dengan menggabungkan beberapa bahan kimia tambahan, gesekan polutan dari permukaan tanah meningkat. Jenis bahan kimia tambahan dan faktor lingkungan seperti pH dan rasio *solid/liquid* (S/L) mempengaruhi proses pencucian tanah secara signifikan. Dalam kasus tanah terkontaminasi minyak mentah (COCS), rasio S/L dan jenis surfaktan yang digunakan sangat mempengaruhi efisiensi penyisihan remediasi pencucian tanah. Di sisi lain, jenis bahan pengkkelat yang ditambahkan dan pH air cucian secara signifikan mempengaruhi hasil ketika diaplikasikan untuk meremediasi tanah yang terkontaminasi merkuri. Sifat fisika dan kimia tanah juga harus diperhatikan dalam penerapan teknologi ini seperti distribusi ukuran partikel (PSD) dari tanah yang terkontaminasi. Gambar 5.1 menunjukkan reaktor *soil washing* dalam skala konseptual maupun laboratorium.



Gambar 5.1 Reaktor *Soil Washing*

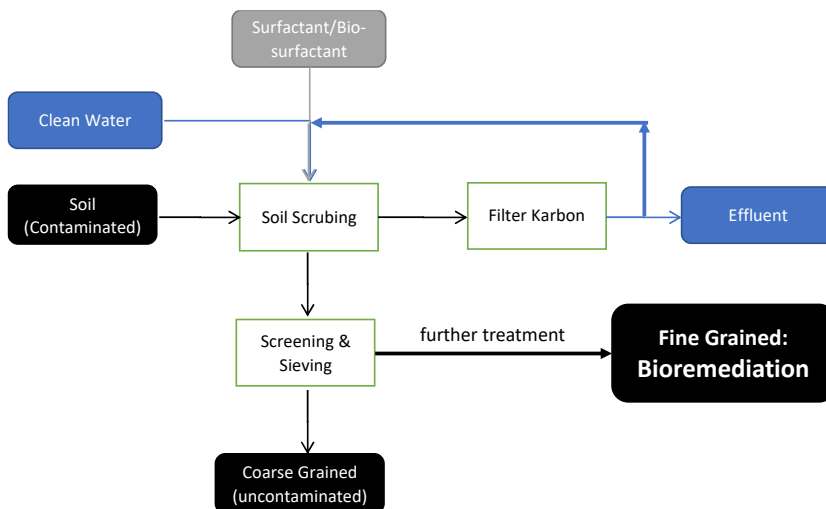
5.1 Aplikasi *Soil Washing* pada Tanah Tercemar Minyak Bumi

Kajian aplikasi *soil washing* dalam proses ekstraksi TPH dari berbagai jenis tanah terkontaminasi minyak bumi ditunjukkan pada Gambar 5.2. Peningkatan rasio *liquid/solid* dalam proses *soil washing* dengan menggunakan surfaktan menunjukkan pengaruh positif pada persentase penyisihan TPH. Pada jenis sampel tanah pasir (*sand*) terlihat peningkatan persentase penyisihan TPH yang cukup stabil mulai dari penggunaan volume larutan surfaktan dengan rasio *solid/liquid* 1:15 dengan konsentrasi TPH akhir sebesar 4.713 mg/kg (0,47%). Demikian halnya pada jenis tanah *loam* terlihat bahwa peningkatan penyisihan TPH cukup stabil setelah dilakukan penambahan rasio *liquid/solid* sebesar 15. Pada rasio *solid/liquid* 1:15 terjadi penyisihan TPH sebesar 54,98% dengan konsentrasi TPH akhir sebesar 7.255 mg/kg (0,73%). Hal yang sama terjadi pada jenis tanah *sandy loam* peningkatan rasio *liquid/solid* juga menunjukkan pengaruh positif pada penyisihan TPH. Peningkatan penyisihan menunjukkan rasio *liquid/solid* sebesar 15 mampu menyisihkan kontaminan TPH pada tanah sebesar 50,82% dengan konsentrasi TPH akhir sebesar 22.020 mg/kg (2,20%). Terlihat bahwa jenis tanah sangat mempengaruhi kinerja *soil washing* dalam proses ekstraksi TPH. *Soil washing* akan bekerja dengan sangat baik pada jenis tanah *coarse grained* yang memiliki kandungan *sand* cukup tinggi.



Gambar 5.2 Soil Washing TPH pada Berbagai Jenis Tanah. (a): sand; (b) loam; (c) sandy loam

Sama halnya dengan teknologi remediasi melalui pendekatan fisik-kimia lainnya, maka *soil washing* dapat digunakan sebagai *pre-treatment* (prapengolahan) untuk remediasi lainnya terutama yang terklasifikasi sebagai *destruction remediation* seperti misalnya bioremediasi. Skema pada gambar berikut ini menunjukkan konfigurasi dari aplikasi proses fisik-kimia-biologi secara serial dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja proses pemulihan fungsi lingkungan hidup tanah tercemar minyak bumi sehingga dapat mencapai konsentrasi TPH acuan atau standar yang telah ditetapkan dan dapat dicapai dalam waktu yang relatif singkat dengan biaya pengolahan serendah mungkin.



Gambar 5.3 Skema pengolahan TPH secara fisik-kimia-biologi

5.2 Aplikasi *Soil Washing* pada Tanah Tercemar Merkuri

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Vina dkk. (2020) yang disajikan pada tabel di bawah ini, dapat disimpulkan bahwa kalium iodida (KI) merupakan larutan pencuci yang cocok untuk diaplikasikan dalam ekstraksi merkuri dalam tanah melalui pendekatan *soil washing*. Kondisi optimum ekstraksi merkuri didapatkan pada pH 2, konsentrasi larutan pencuci KI 0,25 M dan rasio solid/liquid sebesar 1:15. Pada kondisi optimum tersebut, kalium iodida mampu menyisahkan merkuri lebih dari 88% dengan nilai koefisien distribusi 0,185 L/kg. Hasil ini menunjukkan bahwa kalium iodida sangat cocok diaplikasikan dalam ekstraksi merkuri dari tanah tercemar dengan laju desorpsi 0,0025/menit. Kajian dilakukan terhadap sampel tanah tercemar merkuri yang memiliki kandungan tanah liat (*clay*) yang rendah, yaitu sebesar 2,20% dan kandungan *silt* dan *sand* nya yang lebih tinggi, yaitu masing-masing sebesar 85,00 % dan 12,70%, sehingga teknologi remediasi dengan metode *soil washing* sangat cocok untuk diterapkan.

Tabel 5.1 Fraksinasi merkuri sebelum & setelah aplikasi *soil washing*

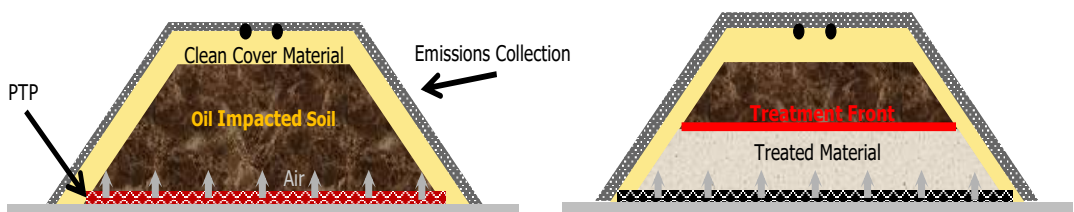
Mercury Fractionation		Mercury Concentration (mg/kg)				
		Before	After			
			KI	KCl	EDTA	H ₂ O
Extractable Mercury-	Organic	46.61	7.90	17.03	37.92	48.37
Extractable Mercury-	Inorganic	6.00	0.29	3.14	20.12	10.72
Non extractable mercury	Semi-mobile mercury	51.71	1.14	2.73	4.59	18.48
Non extractable mercury	Non-mobile mercury	39.46	29.32	23.85	60.21	51.82

6 DESTRUKSI KONTAMINAN DENGAN SMOULDERING

Pada dasarnya *smoldering* atau disebut juga sebagai *Pile Treatment Pad* (PTP) pada pengolahan tanah tercemar, merupakan pengembangan dari “*combustion process*”. Proses *combustion* yang terjadi pada PTP akan terjadi pada temperatur tinggi namun tidak atau kurang menghasilkan “*flame/nyala api*” apabila dibandingkan dengan proses *combustion* pada umumnya. Pada proses *smoldering* ini, bahan bakar yang digunakan memiliki volatilitas yang rendah sehingga proses *combustion* akan terjadi dekat dengan *interface* dari bahan bakar/udara. Sehingga, supaya proses *combustion* terus terjadi, maka akan diperlukan luas permukaan yang besar. Transfer panas dan masa terjadi dengan segera karena masa udara akan ditransportasikan melalui porous media.

Pengolahan limbah padat dengan pendekatan termal yang paling banyak diterapkan saat ini adalah proses insinerasi, yaitu proses *combustion* atau biasanya disebut juga *flaming combustion*, dengan temperatur tinggi dan memerlukan *energy budget* yang tinggi. Proses *smoldering* akhir-akhir ini menjadi salah satu pusat perhatian dalam pengolahan limbah padat karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan insinerasi. Beberapa studi dan literatur menunjukkan bahwa proses *smoldering* ini sudah cukup banyak diterapkan untuk *fecal sludge treatment* (pengolahan lumpur tinja) dan juga terutama untuk remediasi tanah yang terkontaminasi oleh senyawa NAPL (*Non Aqueous Phase Liquids*) dalam hal ini adalah terutama tanah yang tercemar oleh minyak bumi. Namun, di sisi lain proses *smoldering* ini tidak dapat digunakan untuk berbagai jenis pencemar seperti halnya insinerasi. Proses *smoldering* ini hanya terbatas pada pengolahan senyawa organik dan tidak dapat diaplikasikan untuk mengolah logam dan logam berat. Proses *smoldering* ini diterapkan secara *batch*, sehingga proses untuk setiap tahapannya akan berlangsung lebih lambat.

Conceptual Cross-Section





Gambar 6.1 Diagram konseptual dan *pilot scale* proses *smouldering*

Indikator utama keberhasilan proses pengolahan dengan teknik *smoldering combustion* ini adalah terutama turunnya kandungan TPH dalam tanah yang semula terkontaminasi oleh minyak bumi. Kandungan TPH berdasarkan hasil uji coba dapat dilihat pada tabel di bawah ini. Pada Tabel 6.1 terlihat bahwa proses *smoldering combustion* dengan teknik PTP yang digunakan dalam mengolah tanah tercemar minyak bumi memberikan hasil yang sangat baik. TPH inisial, yaitu konsentrasi TPH tanah tercemar minyak bumi sebelum dilakukan pengolahan terukur sebesar 5,5% atau 55.000 mg/kg dengan dominasi hidrokarbon non-volatile, yaitu C15-C36. Setelah dilakukan proses *smoldering* dalam unit PTP, konsentrasi TPH yang terukur menjadi 0,0187%. Sehingga, efisiensi pengolahan dengan teknik PTP ini mencapai 99,7%. Hasil pengolahan ini mengindikasikan bahwa proses *smoldering* PTP dapat digunakan sebagai alternatif teknologi pemulihan tanah tercemar minyak bumi. Hasil uji coba lebih lanjut yang dilakukan menunjukkan bahwa efisiensi pengolahan PTP ini mencapai 93% hingga hampir mendekati 100% di mana ada beberapa hasil menunjukkan konsentrasi TPH terukur setelah pengolahan adalah tidak terdeteksi.

Tabel 6.1 Penurunan Konsentrasi TPH dengan PTP

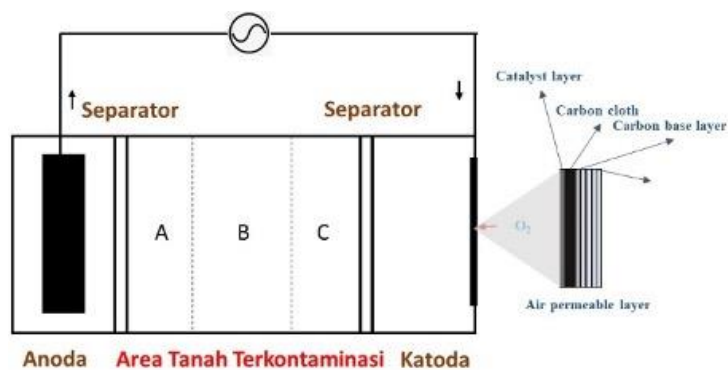
TPH (mg/kg)	TTM	Treated
TPH C10-C14	971	<40
TPH C15-C28	25100	80
TPH C29-C36	29000	107
Total Petroleum Hydrocarbon (C10-C36)	55000	187

7 PEMANFAATAN TEKNOLOGI AIR CATHODE ELECTROCOAGULATION DALAM REMEDIASI

Remediasi Elektrokinetik (EK) yang telah diuraikan di atas adalah salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk pemulihan lahan tercemar oleh polutan seperti logam berat dan senyawa organik dengan menggunakan energi listrik dan arus searah konstan (Alcantara *et al*, 2012). Beberapa hal yang mempengaruhi kinerja pada remediasi elektrokinetik adalah kondisi tanah dan sistem desain (Mosavat *et al.*, 2012). Kondisi tanah akan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis tanah dan mineral yang terkandung pada tanah, kelembaban tanah, pH, dan elektro-konduktifitas pada air yang terkandung pada tanah (Kim *et al.*, 2011a). Sedangkan untuk sistem desain beberapa faktor yang mempengaruhi adalah besarnya arus dan beda tegangan yang digunakan, jenis dari elektroda yang digunakan, dan waktu operasional (Kim *et al.*, 2011b). Ada beberapa hal yang menjadi kekurangan dari teknologi remediasi elektrokinetik ini di antaranya penggunaan energi listrik yang relatif besar pada saat aplikasi lapangan. Hal ini tentu saja akan berimbas pada biaya operasional yang tinggi. Dampak dari penggunaan energi listrik yang terlalu tinggi adalah adanya panas yang terbentuk di sekitar elektroda yang dapat menyebabkan beberapa efek samping seperti tanah menjadi kering ataupun retakan pada bangunan sekitar. Selain itu, konsumsi listrik selama proses EK, penggunaan elektroda dan cairan kimia selama proses instalasi dan operasional dapat menghasilkan emisi pencemar udara.

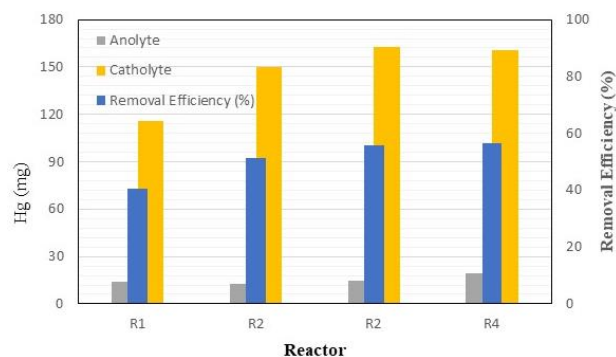
Air Cathode Electrocoagulation (ACEC) adalah teknologi relatif baru yang memiliki potensi sebagai pengganti teknologi elektrokoagulasi konvensional. Kelebihan utama dari teknologi ini dibanding dengan teknologi konvensional yang sudah ada adalah (1) teknologi ini secara bersamaan dapat dijadikan sebagai teknologi pengolah limbah dan penghasil energi listrik, (2) teknologi ini tidak memerlukan tambahan energi dari luar (*power supply*) sehingga lebih hemat energi. Pemanfaatan *Air Cathode Electrocoagulation* (ACEC) diharapkan dapat memberikan solusi terhadap permasalahan-permasalahan yang ada. Pengembangan teknologi *air cathode electrokinetic cell* (ACEC) yang digunakan untuk pemulihan lahan tercemar logam berat. ACEC merupakan modifikasi dari Teknologi Elektrokinetik (EK) konvensional yang memiliki potensi untuk digunakan pada pemulihan lahan tercemar dengan efisiensi energi yang lebih baik. Pada penelitian ini akan dilakukan evaluasi

dan optimasi terkait teknologi ACEC dalam menyisihkan logam berat pada tanah/lumpur dengan mengatur parameter operasional seperti besarnya arus yang diberikan pada reaktor, elektrolit yang digunakan, dan kelembaban tanah yang diolah. Gambar 7.1 berikut menunjukkan konfigurasi ACEC dalam remediasi tanah tercemar logam berat, dalam hal ini merkuri.



Gambar 7.1 Konfigurasi ACEC dalam remediasi tanah tercemar

Pada Gambar 7.2 terlihat bahwa konsentrasi Hg terukur lebih tinggi pada catholyte jika dibandingkan dengan pada anolyte. Hal ini menunjukkan bahwa arah pergerakan dari Hg adalah menuju ke katode dikarenakan merkuri yang memiliki muatan positif sehingga cenderung bergerak ke arah elektroda negatif (Katoda). Selain itu dapat diperkirakan bahwa mekanisme penyisihan Hg pada reaktor didominasi oleh elektroosmosis jika dibandingkan dengan elektromigrasi. Hal ini dapat dilihat pada jumlah kumulasi elektroosmosis yang relatif besar. Total efisiensi penyisihan masing-masing reaktor adalah 40,6%, 51,2%, 55,6%, dan 56,5%. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi kelembaban maka efisiensi penyisihan semakin besar.

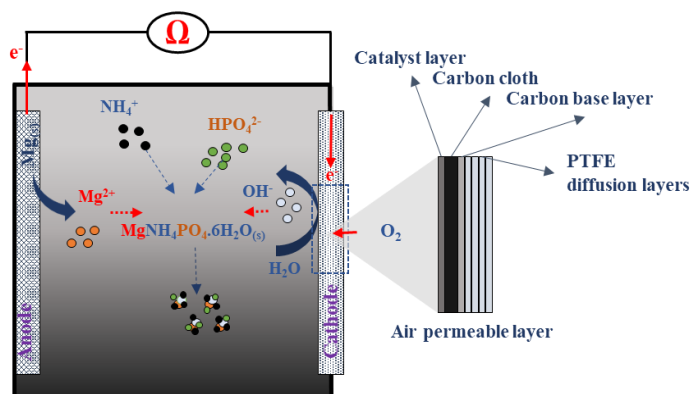


Gambar 7.2 Akumulasi merkuri pada remediasi ACEC

Dari hasil kajian ini terlihat bahwa reaktor ACEC memiliki kemampuan yang cukup baik dalam menyisihkan merkuri dalam tanah. Walaupun penyisihannya tidak sebesar elektrokinetik konvensional, tetapi efisiensi penyisihan ACEC masih dapat ditingkatkan dengan menaikkan kelembaban tanah sampai pada titik tertentu.

8 STRUVITE DARI NUTRIENT RECOVERY SEBAGAI REMEDIATION AGENT

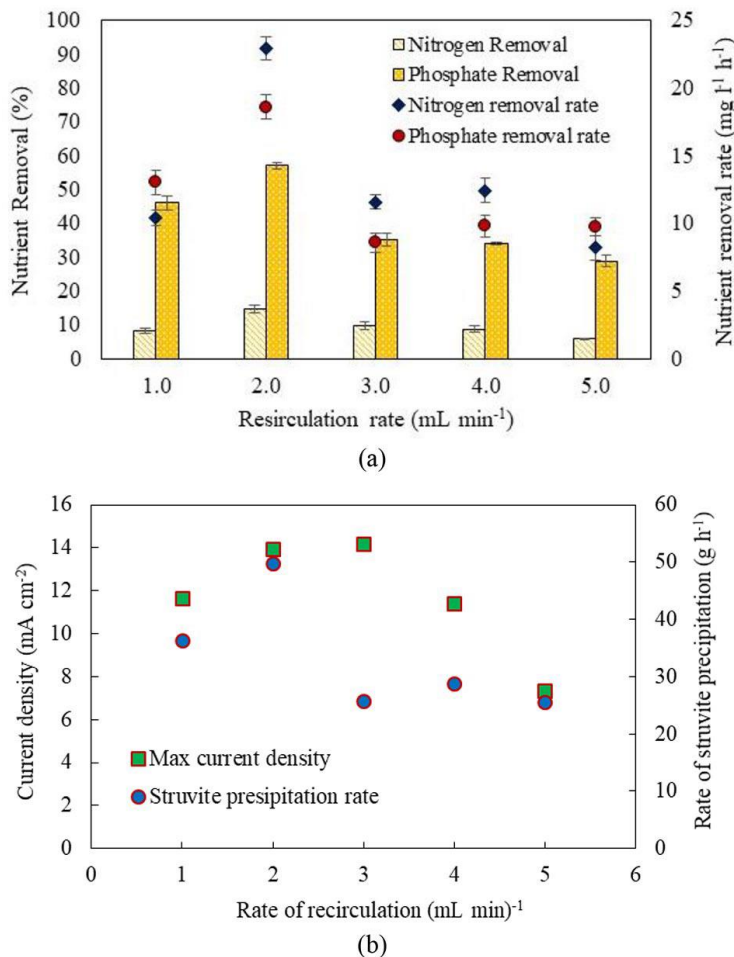
Salah upaya upaya meningkatkan kinerja dari proses bioremediasi adalah melalui pendekatan biostimulasi seperti yang telah diuraikan pada pembahasan sebelumnya di mana salah satunya adalah menjaga kehadiran nutrisi dalam jumlah yang optimum. Dalam aplikasinya, ketersediaan nutrisi dipenuhi melalui penambahan pupuk urea untuk sumber N dan pupuk NPK sebagai sumber P dan K untuk pertumbuhan mikroorganisme yang terlibat dalam proses bioremediasi. Sebagai upaya *resource recovery* yang bersumber dari air limbah yang kaya akan nutrisi yang diperlukan dalam proses bioremediasi, maka perolehan nutrisi melalui pengolahan air limbah dengan teknologi ACEC, yang terpresipitasi sebagai *struvite* atau *Magnesium Ammonium Phosphate Hexahydrate* (MAP) ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.1, diharapkan dapat menjadi *bioremediation agent* sebagai pengganti pupuk sintetis yang selama ini digunakan dalam proses *biostimulation*, terutama sebagai sumber P.



Gambar 8.1 Mekanisme Pembentukan Struvite dalam Reaktor ACEC

Gambar 8.2 menunjukkan bahwa kinerja reaktor ACEC tidak hanya dipengaruhi oleh waktu retensi nutrisi dalam reaktor. Parameter lain yang

harus diperhatikan dalam reaktor ACEC adalah arus yang dihasilkan dari reaktor. Gambar (b) menunjukkan efek laju resirkulasi pada kerapatan arus potensial dan laju *presipitasi struvite*. Gambar menunjukkan bahwa laju terjadi *presipitasi struvite* meningkat secara linear seiring dengan meningkatnya kerapatan arus. Semakin tinggi kerapatan arus, semakin tinggi tingkat *presipitasi struvite*. Sehingga, hal ini juga membuktikan bahwa kinerja reaktor ACEC dalam menghasilkan *struvite* dipengaruhi oleh kerapatan arus potensial yang dihasilkan oleh reaktor.



Gambar 8.2 Pembentukan Struvite dalam Reaktor ACEC (a) Pengaruh terhadap Nutrien dalam Air Limbah; (b) Pengaruh Kerapatan Arus yang Terbentuk

PENUTUP

Remediasi lingkungan adalah suatu upaya kuratif yang bertujuan untuk mengembalikan fungsi lingkungan hidup sesuai dengan amanat yang tercantum dalam Undang Undang Lingkungan Hidup Republik Indonesia No. 32 Tahun 2009 dan sangat erat kaitannya dengan pencapaian SDGs yang telah digariskan oleh PBB. Teknik remediasi adalah pendekatan rekayasa dalam pemulihan fungsi lingkungan hidup dengan melakukan imobilisasi, esktraksi, dan atau destruksi kontaminan dalam tanah maupun air tanah. Pendekatan pengolahan fisik-kimia, termal dan biologi baik secara individual maupun simultan telah banyak diaplikasikan dalam remediasi lingkungan. Ruang inovasi masih sangat luas dalam aplikasi berbagai Teknik Remediasi karena jenis kontaminan yang hadir di lingkungan semakin variatif dan semakin persisten, di mana di antaranya adalah upaya peningkatan *bioavailability* terhadap berbagai jenis kontaminan tersebut.

Semoga tulisan ini dapat memberikan gambaran secara utuh permasalahan pencemaran tanah secara nasional maupun global dan upaya-upaya remediasi yang dapat dilakukan agar supaya fungsi lingkungan hidup dapat dipulihkan untuk mendukung tercapainya pembangunan yang berkelanjutan. Penulis sebagai Guru Besar dalam bidang Remediasi Lingkungan berharap dapat terus berkontribusi dalam pengembangan teknologi remediasi melalui pendidikan, penelitian dan pengabdian masyarakat sebagai bentuk pertanggungjawaban kepada masyarakat atas jabatan yang diembannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji Syukur saya panjatkan kehadirat Allah Swt. serta Nabi Besar Muhammad Saw. karena atas rahma dan petunjuk-Nya, saya mendapatkan amanat jabatan akademik sebagai Guru Besar dalam bidang Remediasi Lingkungan di Institut Teknologi Bandung. Ucapan terimakasih, saya sampaikan kepada:

- Ibunda tercinta, Ibu Hj. Emin Aminah dan Ayahanda Almarhum Dadang Setiawan Effendi, yang telah membesarkan kami hingga pada keadaan saat ini
- Istri tercinta, Nailul Hidayah dan anak-anak tersayang, Fabio Anatra Rahmana dan Namira Anatri Yasmin

- Keluarga Besar Ahlul Jannah, terutama kakak-kakak dan adik-adik tercinta: Ice Tridasa Setiawati & Dr. M Toha, Lina Wardhani & Prof. Yoga Yuniadi, serta Dr. Dida Diah Damayanti & Zakaria, beserta para keponakan
- Keluarga besar Natadikarta & Soelaiman Effendi yang telah mendukung secara langsung maupun tidak langsung
- Keluarga besar Imberan Banjarmasin dengan segala dukungannya yang luar biasa
- Guru-guru yang sangat berjasa dalam pengembangan diri saya di ITB, terutama Alm Dr. Moestikahadi Soedomo, Alm Prof. Dr. Asis Djajadiningrat, Prof. Dr. Harun Sukarmadidjaja & Prof. Dr. Wisjnuaprpto serta Dr. Suseno Kramadibrata
- Pimpinan ITB dan Dekanat FTSL serta para anggota senat FTSL ITB
- Para anggota Senat Akademik dan Forum Guru Besar ITB
- Ketua KK Rekayasa Air & Air Limbah, Prof. Dr. Mindriany Syafila beserta anggota KK lainnya
- Para Guru Besar yang telah berkenan memberikan rekomendasi: Prof. Dr. Mindriany Syafila, Prof. Dr. Suprihanto N, Prof. Dr. Prayatyni, Prof. Dr. Rudy Sayoga G, Prof. Dr. Tjandra Setiadi, Prof. Dr. Bismo Setijo dari UI, Prof. Dr. Yulinah Trihadiningrum dari ITS, dan Distinguished Prof. S. Vigneswaran dari University of Technology Sydney.
- Para Profesor lainnya di TL Raya: Prof. Dr. Barti Setiani, Prof. Dr. Arwin Sabar, Prof. Dr. Puji Lestari dan Prof. Dr. Enri Damanhuri
- Para Kaprodi dan Dosen TL Raya serta sivitas akademika TL Raya lainnya yang tidak mungkin saya sebutkan satu persatu
- Para Mahasiswa Bimbingan yang turut berperan aktif dalam pemenuhan Karya Ilmiah untuk mencapai jabatan Guru Besar: Tiwi, Bimasetya (UNDIP); Marita Wulandari (ITK); Thye Yoke Pean (Singapura); Dyah Wulandari P, Endang Setiawati (ITERA), Ahmad Taufiq (Kepala Balai Air Tanah, DJSDA-PUPR) dan Evie Aviatun (Unpas)
- Para Kasubdit dan Kasie Direktorat Kampus ITB Jatiningor (DKIJ)
- Rekan-rekan TL ITB angkatan 86 yang tidak dapat disebutkan satu persatu.
- Rekan-rekan 3B7 lulusan tahun 1986 SMAN 3 Bandung
- Pihak lain yang tidak mungkin disebutkan satu persatu

DAFTAR PUSTAKA

- Acar, YB, Alshawabkeh, A. 1993. Principles of electrokinetic remediation. Environmental Science & Technology
- Agus Jatnika Effendi and Tiwi Aminati, "*Enhancing Bioremediation on Crude Oil Contaminated Soil by Combining With Photocatalytic Process Using TiO₂ as Catalyst*" International Jurnal of Geomate, Dec, 2019 Vol 17, Issue 64, PP 100-107, Japan
- Agus Jatnika Effendi dan Hadrah, "*Optimasi Rasio Solid/Liquid pada Teknik Soil Washing Tanah Terkontaminasi Minyak dari Proses Eksplorasi Minyak Bumi*", Jurnal Teknik Lingkungan Volume. 21, Nomor.1, Mei 2015
- Agus Jatnika Effendi, Edwan Kardena, Qomarudin Helmy, "*Biosurfactant-Enhanced Petroleum Oil Bioremediation*", a book chapter dalam buku "*Microbial Action on Hydrocarbons*", Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018
- Agus Jatnika Effendi, Marita Wulandari, Tjandra Setiadi, "*Ultrasonic Application in Contaminated Soil Remediation*", Journal Current Opinion in Environmental Science & Health Vol. 12, 2019, pp 66-71
- Agus Jatnika Effendi, Vina Lestari., Mohammad Irsyad, "*Optimizing soil washing remediation of mercury contaminated soil using various washing solutions and solid/liquid ratios*", E3S Web Conf. Volume 148, 2020 The 6th Environmental Technology and Management Conference (ETMC) in conjunction with The 12th AUN/SEED-Net Regional Conference on Environmental Engineering (RC EnvE) 2019
- Agus Jatnika Effendi., Bimastyaji Surya Ramadan., Qomaruddin Helmy, "*Enhanced remediation of hydrocarbons contaminated soil using electrokinetic soil flushing – Landfarming processes*", Bioresource Technology Reports Volume 17, February 2022, Elsevier Ltd. Publisher
- Agus Jatnika Effendi., Roopa Kamath., Jamal Syakir., Sara McMillen., Natasha Sihota., Eve Zuo., Kammy Sra., Deyuan Kong., Tri Wisono., "*Strategies for Enhancing Bioremediation for Hydrocarbon - Impacted Soils*", Publication Name : Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social R, 2017

- Agus Jatnika Effendi., Syarif Hidayat., Syafrudin, Bimastyaji Surya Ramadan., Candra Purnaman, Joo-Yang Park, "*Performance of Microbial Reverse-Electrodialysis Cells for Power Generation at Different External Resistance*" Air, Soil and Water Research
- Agus Jatnika Effendi., Marita Wulandari, "*The impact of ultrasonic power and time for the removal of Total Petroleum Hydrocarbon from low permeability contaminated soils*", The 1st International Conference on Environmental Sciences (ICES2018), IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 314 (2019)
- Alcántara, M.T., Pazos, J.G.M., Sanromán, M.A., 2012. *Electrokinetic remediation of lead and phenanthrene polluted soils*. Geoderma 173–174, 128–133
- Bautista, L.F., Sanz, R., Molina, M.C., González, N. and Sánchez, D., 2009. *Effect of different non-ionic surfactants on the biodegradation of PAHs by diverse aerobic bacteria*. International Biodeterioration & Biodegradation, 63(7), pp.913-922
- Bossert, I. D., & Compeau, G. C., Cleanup of Petroleum Hydrocarbon Contamination in Soil. In L. Y. Young, & C. E. Cerniglia, Microbial Transformation and Degradation of Toxic Organic Chemicals. New York: Wiley-Liss, Inc. 1995, pp. 77-125
- Brame, J. A., Seok, W. H., Lee, J., Lee, S.-H., & Alvarez, P. J., *Photocatalytic pre-treatment with food-grade TiO₂ increases the bioavailability and bioremediation potential of weathered oil from the Deepwater Horizon oil spill in the Gulf of Mexico*. Chemosphere, Vol. 80, Issue 8, 2013, pp. 2315-2319
- FAO and UNEP (2021), "Global Assessment of Soil Pollution: report", FAO & UNEP Publisher, Rome, Italy, 2021
- Feng, D. & Aldrich, C.(2000): *Sonochemical treatment of simulated soil contaminated with diesel*. Adv. Environ. Res. 4(2), 103–112
- Gong, X.-B. 2012. *Remediation of weathered petroleum oil-contaminated soil using a combination of biostimulation and modified Fenton oxidation*, Intl. Biodeterioration & Biodegradation, 70, pp. 89-95
- González, N., Simarro, R., Molina, M.C., Bautista, L.F., Delgado, L. and Villa, J.A., 2011. *Effect of surfactants on PAH biodegradation by a bacterial*

- consortium and on the dynamics of the bacterial community during the process. Bioresource Technology, 102(20), pp.9438-9446*
- Kim, B.-K., Baek, K., Ko, S.-H., Yang, J.-W., 2011a. *Research and field experiences on electrokinetic remediation in South Korea. Sep. Purif. Technol. 79, 116–123*
- Kim, G.-N., Shon, D.-B., Park, H.-M., Lee, K.-W., Chung, U.-S., 2011b. *Development of pilot-scale electrokinetic remediation technology for uranium removal. Sep. Purif. Technol. 80, 67–72*
- Kim, Y., dan M. C. Wang, (2003): *Effect of ultrasound on oil removal from soils, Ultrasonics, vol. 41, 539-542*
- Koolivand, A., Naddafi, K., Nabizadeh, R., Jafari, A.J., Nasser, S., Yunesian, M., Yaghmeien, K and M. Alimohammadi. 2014. *Application of Hydrogen Peroxide and Fenton as Pre- and Post-Treatment Steps for Composting of Bottom Sludge from Crude Oil Storage Tanks, Petroleum Science and Technology, 32, pp. 1562–1568*
- McMillen, S.J., Smart, R. Bernier, R., Hoffman, R.E. 2004. *Biotreating E&P Wastes: Lessons Learned from 1992-2003. SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, 29-31 March, Calgary, Alberta, Canada. SPE-86794-MS*
- Mosavat, N., Oh, E., Chai, G., 2012. *A Review of Electrokinetic Treatment Technique for Improving the Engineering Characteristics of Low Permeable Problematic Soils. Int. J. of GEOMATE, 2 (2). 266-272*
- Mosavat, Nasim; Oh, Erwin; Chai, Gary. 2012. *A review of electrokinetic treatment technique for improving the engineering characteristics of low permeable problematic soil. Griffith University. Australia.*
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia no. P.101/MENLHK/SETJEN/KUM.1/11/2018 ; Tahun 2018; Tentang, Tentang Pedoman Pemulihan Lahan Terkontaminasi Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun
- Rodrigues, A.; Nogueira, R., Melo, L.F., and A.G. Brito. 2013. *Effect of low concentrations of synthetic surfactants on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) biodegradation, International Biodeterioration & Biodegradation, 83, pp. 48-55*

- Sharma H.D. & Reddy K.D., Geonvironmental Engineering: Site Remediation, Waste Containment and Emerging Waste Management Technology., John Wileys & Son, 2004
- Speight, J. G. & Arjoon K. K., *Bioremediation of Petroleum and Petroleum Products*. Scrivener Publishing LLC., 2012
- Sun, N., Wang, H., Chev, Y., Lu, Si, and Y. Xiong. 2008. *Effect of Surfactant SDS, Tween 80, Triton X-100 and Rhamnolipid on Biodegradation of Hydrophobic Organic Pollutants*. Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2008. ICBBE 2008.
- Suprihanto (2005), Pencemaran Tanah & Air Tanah., Penerbit ITB, 2005
- Sutton, N.B., Grotenhuis, T., and Huub H.M. Rijnaarts. 2014. *Impact of organic carbon and nutrients mobilized during chemical oxidation on subsequent bioremediation of a diesel-contaminated soil*. Chemosphere. 97 (2014), pp. 64–70
- United Nations, “Soil and United Nations Sustainable Development Goals”, INF-119-en Published 18 Dec 2019 Last modified 18 Dec 2019
- United State Environmental Protection Agency, “Federal Remediation Technologies Roundtable (FRTR), 2001
- Wang, W., Xu J., Huang, F., and Y. Cui. 2015. *Hydrogen peroxide (H₂O₂) requirement for the oxidation of crude oil in contaminated soils by a modified Fenton’s reagent*, Toxicological & Environmental Chemistry, 97:3- 4, pp. 275-281
- Wood, R.J, Lee, J., Bussemaker, M.J., (2017): *A parametric review of sonochemistry: Control and augmentation of sonochemical activity in aqueous solutions*. Ultrasonic Sonochemistry, **38**, 351-370
- Xu, J., Lei, X., Huang, T., and K. Chang. 2011. *Enhanced bioremediation of oil contaminated soil by graded modified Fenton oxidation*, Journal of Environmental Sciences, 23(11), pp. 1873–1879
- Yen, C.H., Chen, K.F., Kaoc, C. M., Liang, S.H., and T.Y. Chen. 2011. *Application of persulfate to remediate petroleum hydrocarbon-contaminated soil: Feasibility and comparison with common oxidants*. Journal of Hazardous Materials 186 (2011) 2097–2102
- Young-Hyun Songa., Syarif Hidayat., Agus Jatnika Effendi., Joo-Yang Park, "Simultaneous hydrogen production and struvite recovery within a microbial

reverse-electrodialysis electrolysis cell" Journal of Industrial and Engineering Chemistry Volume 94, 25 February 2021, Pages 302-308

Zhang, D., and L. Zhu. 2014. *Controlling microbiological interfacial behaviors of hydrophobic organic compounds by surfactants in biodegradation process.* Front. Environ. Sci. Eng. 2014, 8(3): 305–315.

CURRICULUM VITAE



Nama : Ir. Agus Jatnika Effendi, Ph.D.
 NIP : 196708181993031002
 Tempat/tgl lahir : Bandung 18 Agustus 1967
 Kel. Keahlian : Rekayasa Air & Limbah Cair
 Bidang Keilmuan : *Environmental Remediation*
 Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

No.	Jenjang Pendidikan	Perguruan Tinggi	Tahun Lulus	Gelar	Bidang
1.	S1	ITB	1991	ST	Teknik Lingkungan
2.	S3	University of Wales, UK	1999	Ph.D	Pure & Applied Biology
3.	Profesi	ITB	2017	Ir	Teknik Lingkungan

II. JABATAN PIMPINAN DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun
1.	Ketua Program Studi Sarjana Teknik Lingkungan FTSL - ITB	2008-2011
2.	Sekretaris Eksekutif Pusat Studi Lingkungan Hidup (PSLH) ITB	2012 - 2013
3.	Kepala Sub Direktorat Pemantauan dan Evaluasi Pendidikan Direktorat Pendidikan ITB	2015 - 2019
4.	Kepala Sub Direktorat Program profesi Insinyur – Direktorat Pendidikan ITB merangkap Ketua Program Studi Program Profesi Insinyur	2019 - 2020
5.	Direktur Kampus ITB Jatinangor	2020 - 2024

III. KEGIATAN PENDIDIKAN/PENGAJARAN

Mata Kuliah/Praktikum/Studio	S1/S2/S3
Pengantar Rekayasa & Design	S1 FTSL
Rekayasa Proses Biologi	S1 TL
Pengolahan Fisik Kimia	S1 TL
Satuan Proses	S1 RIL
Pengolahan Limbah Industri	S1 RIL
Sanitasi Pascabencana	S1 RIL
Rekayasa Lingkungan Pengelolaan Sumber Daya Alam	S1 TL
Teknik Remediasi	S1 TL
Rekayasa dan Aplikasi Bioremediasi	S2 TL
Sanitasi Kawasan Bencana	S2 PIAS
Pembimbing TA/Tesis/Disertasi	S1/S2/S3 TL

IV. PENULISAN BUKU TEKS

No.	Pengarang; Judul	Penerbit
1	Agus Jatnika Effendi , Edwan Kardena, Qomarudin Helmy., "Biosurfactant-Enhanced Petroleum Oil Bioremediation", a book chapter dalam buku "Microbial Action on Hydrocarbons"	Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018, ISBN: 798-91-13-1839-9

V. PENELITIAN/PUBLIKASI

V.1. Dalam jurnal internasional ber-*refere* dan diakui

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./tahun
1	Endang Setiawati., Suprihanto Notodarmojo., Prayatni Soewondo., Agus Jatnika Effendi ., Bambang Widjanarko Otok, "Infrastructure Development Strategy for Sustainable Wastewater System by using SEM Method (Case Study Setiabudi and Tebet Districts, South Jakarta"	Procedia Environmental Sciences Vol. 17, (2013)
2	YP Thye., AJ Effendi ., P Soewondo., D Brdjanovic and T Setiadi, "Understanding how people innovate for emergency sanitation: A case study of a local NGO"	Jurnal Water Practice and Technology, Vol. 10 Issue. 4,
3	Thye Yoke Pean., Agus Jatnika Effendi ., Prayatni Soewondo., Damir Brdjanovic., Tjandra Setiadi, "A Case Study of Excreta Disposal Following the 2006 Java Earthquake"	Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 47 No.2, 2015
4	Dyah Wulandari Putri., Prayatni Soewondo., Agus Jatnika Effendi ., Tjandra Setiadi, "Sustainability Analysis of Domestic Wastewater Treatment Technology Applied on Human Settlement in Swamp Area"	International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 9
5	E. Afiatun., S. Notodarmojo., A.J. Effendi and K.A. Sidarto, "Cost Minimization of Raw Water Source by Integrated Water Supply Systems (A Case Study For Bandung, Indonesia)",	International Journal of GEOMATE, June, 2018 Vol.14, Issue 46, pp.32-39
6	Bimastyaji Surya Ramadan., Gina Lova Sari., Raden Tina Rosmalina., Agus Jatnika Effendi ., Hadrah, "An overview of electrokinetic soil bioremediation of hydrocarbon contaminated soil"	Journal Environmental Managemant Vol. 218, 15 July 2018, P 309-321
7	Ahmad Taufiq, Takahiro Hosono, Irwan Iskandar, Agus Jatnika Effendi , Lambok Maringan Hutasoit, "Estimating Groundwater Mixing Ratios from Vertical Flux Processes due to Excessive Groundwater Pumping Using Hydrogeochemical Parameters and Nitrate Concentrations in the Bandung Basin, Indonesia"	Journal of the Croatian Geological Survey, 2018, Vol. 71 No. 3, P 173 – 184
8	Ahmad Taufiq., Takahiro Hosono., Kiyoshi Ide., Makoto Kagabu., Irwan Iskandar., Agus J. Effendi ., Lambok M. Hutasoit., Jun Shimada, "Impact of excessive groundwater pumping on rejuvenation processes in the Bandung basin (Indonesia) as determined by hydrogeochemistry and modeling"	Hydrogeology Journal Volume 26, Issue 4, 1 June 2018, Pages 1263-1279
9	Ahmad Taufiq., Agus J Effendi ., Irwan Iskandar., Takahiro Hosono., Lambok M Hutasoit, "Controlling factors and	Water Research Journal, Volume 148, Page. 292-305 (2019)

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./tahun
	driving mechanisms of nitrate contamination in groundwater system of Bandung Basin, Indonesia, deduced by combined use of stable isotope ratios, CFC age dating, and socioeconomic parameters"	
10	Agus Jatnika Effendi and Tiwi Aminati, "Enhancing Bioremediation on Crude Oil Contaminated Soil by Combining with Photocatalytic Process Using TiO ₂ as Catalyst"	International Jurnal of Geomate, Dec, 2019 Vol 17, Issue 64, PP 100-107
11	Agus Jatnika Effendi , Marita Wulandari, Tjandra Setiadi, "Ultrasonic Application in Contaminated Soil Remediation",	Current Opinion in Environmental Science & Health
12	Agus Jatnika Effendi. , Syarif Hidayat., Syafrudin., Bimastyaji Surya Ramadan., Candra Purnawan., Joo-Yang Park, " Performance of Microbial Reverse-Electrodialysis Cells for Power Generation at Different External Resistance"	Journal Air, Soil and Water Research Volume 13 Issue , January-December 2020
13	Kardena, E., Pratama, A.N.K., Suhardi, S.H., Hasan, K., Effendi, A.J. , "Decolorisation of batik waste water by marasmiellus palmivorus using modified fixed bed reactor"	Malaysian Applied Biology, 2020, 49(2), pp. 55–61
14	Song, Y.-H., Hidayat, S., Effendi, A.J. , Park, J.-Y., "Simultaneous hydrogen production and struvite recovery within a microbial reverse-electrodialysis electrolysis cell"	Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2021, 94, pp. 302–308
15	Purnawan, C., Dewi, C.C., Syafrudin., Effendi, A.J. , Hidayat, S., "The influence of ZnCl ₂ activation on macronutrient NPK adsorption simultaneously using coconut shell biochar for soil fertility improvement"	Molekul, 2021, 16(1), pp. 75–81
16	Budihardjo, M.A., Syafrudin, Effendi, A.J. , Muhammad, F.I., Ramadan, B.S., "Waste valorization using solid-phase microbial fuel cells (SMFCs): Recent trends and status"	Journal of Environmental Management, 2021, 277, 111417
17	Effendi, A.J. , Ramadan, B.S., Helmy, Q., "Enhanced remediation of hydrocarbons contaminated soil using electrokinetic soil flushing – Landfarming processes"	Journal of Bioresource Technology Reports, 2022, 17, 100959
18	Effendi, A.J. , Baashen, M.S., Hidayat, S., "Nutrient Recovery From Organic-Rich Wastewater Through Struvite Precipitation using Air Cathode Electrocoagulation Technology"	Journal of Air, Soil and Water Research, 2022, 15
19	Budihardjo, Mochamad Arief;Ramadan, Bimastyaji Surya; Safitri, Rahayu Puji; Effendi, Agus Jatnika ;Hidayat, Syarif;Paramitadevi, Yudith Vega;Ratnawati, Beata., "Metals Removal from Contaminated Soil Using Electrokinetic Treatment – Effect of Different Permeable Reactive Barrier and Flushing Solution"	Ecological Engineering and Environmental Technology, 2023, 24(2), pp. 19–27

V.2. Dalam jurnal nasional terakreditasi

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol tahun
1.	Allen Kurniawan dan Agus Jatnika Effendi , "Biodegradasi Residu Total Petroleum Hidrokarbon di Bawah Konsentrasi 1% (W/W) Hasil Proses Bioremediasi"	Jurnal Manusia dan Lingkungan Vol. 21, No. 3 (2014) Hal 286 - 294
2.	Agus Jatnika Effendi dan Regi Risman sandi, "Removal of COD & NH ₃ from Produced Water using Modified Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands (HSCW)"	Reaktor Chemical Engineering Journal Vol. 18, No. 3, 2018
3.	Allen Kurniawan., Yanuar Chandra Wirasembada., Indah Mutiara Ningtyas Razaad., Adi Novriansyah., Mohamad Rafi., Agus Jatnika Effendi , "Hidrokarbon Aromatik Polisiklik pada Lahan Tercemar Limbah Minyak Bumi: Tinjauan Pertumbuhan Mikro-Organisme, Proses Metabolisme dan Biodegradasi"	Jurnal Ilmu Lingkungan , Vol. 16 No. 1 (2018)

V.3. Dalam jurnal lainnya

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol tahun
1	Puti Sri Komala, Naraina Ananthi, Agus Jatnika Effendi , IG. Wenten, Wisjnuaprpto, "Pengaruh waktu retensi hidrolis reaktor anoksik terhadap biodegradasi zat warna azo reaktif menggunakan bioreaktormembran aerob-anoksik"	Jurnal Teknologi Lingkungan, Desember 2008, Vol. 4 No. 4,
2	Puti Sri Komala, Agus Jatnika Effendi , I.G.Wenten dan Wisjnuaprpto, "Penggunaan Limbah Tempe dalam Biodegradasi Zat Warna Azo Menggunakan Bioreaktor Membran Aerob-Anaerob"	Jurnal Teknik Kimia Indonesia, Vol. 8, No. 3 (2009)
3	Dini Adyasari, Agus Jatnika Effendi , "Pengaruh Perubahan Konsentrasi Ko-Substrat Terhadap Populasi Mikroorganisme Pemutus Zat Warna Azo Di Bioreaktor Membran"	Jurnal Teknik Lingkungan, Vol.16 No.1, April 2010
4	Dissa Samatha dan Agus Jatnika Effendi , "Pengaruh Frekuensi dan Waktu Backwash Membrean Terhadap Peningkatan Biomassa pada Bioreaktor Membran"	Jurnal Teknik Lingkungan FTSL-ITB Vol. 16 No. 2, Oktober 2010
5	Mohamad Faiz Jatnika dan Agus Jatnika Effendi , "Pengaruh Umur Lumpur Terhadap Kinerja Bioreaktor Membran Dalam Biodegradasi Zat Warna Azo Remazol Black-5"	Jurnal Teknik Lingkungan Volume 17 Nomor 1, April 2011
6	Ansiha Nur dan Agus Jatnika Effendi , "Aplikasi Elektrokoagulasi Pasangan Elektroda Aluminium pada Proses Daur Ulang Grey Water Hotel	Jurnal Teknik Lingkungan Vol. 20, No. 1, (2014)
7	Eka Pravita Sari dan Agus Jatnika , "Dinamika Populasi Bakteri Heterotrof Dan Autotrof Pada Pengolahan Sludge Produced Water Hasil Eksplorasi Minyak Dan Gas Bumi Dengan Metode Aerated Static Pile Dan Degradasi Anaerobik"	Jurnal Teknik Lingkungan Volume 20 Nomor 1, Mei 2014
8	Agus Jatnika Effendi dan Hadrah, "Optimasi Rasio Solid/Liquid pada Teknik Soil Washing Tanah	Jurnal Teknik Lingkungan Volume. 21

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama jurnal; No. Publikasi; Vol tahun
	Terkontaminasi Minyak dari Proses Eksplorasi Minyak Bumi"	
9	Agus Jatnika Effendi dan Narita Indriati, "Remediasi Tumpahan Minyak Menggunakan Metode Soil Washing Dengan Optimasi Kondisi Reaksi"	Jurnal Teknik Lingkungan FTSL ITB Vol. 21, Nomor. 2, Oktober 2015
10	Ansiha Nur dan Agus Jatnika , "Elektrokoagulasi Monopolar Untuk Menyisihkan Organik Dan Minyak Lemak Air Buangan Domestik (Grey Water)"	Jurnal Teknik Lingkungan UNAND - Dampak Volume 14, No 2, Juli 2017
11	Eka Prihatinningtyas dan Agus Jatnika Effendi , "Karakterisasi Ekstrak Tapioka Dan Tapioka Ionik Sebagai Biokoagulan Dalam Proses Pengolahan Air"	Jurnal Teknologi Lingkungan BPPT, Volume.19 Nomor.2, Juli 2018
12	Dendy Primanandi dan Agus Jatnika Effendi , " Kinetika Pertumbuhan Bakteri Pada Bioremediasi Tanah Tercegar Limbah Tekstil Dengan Teknik Forced-Aerated Static Pile (Studi Kasus: Lahan Sawah Rancaekek)"	Jurnal Teknik Lingkungan ftsl-itb Volume 24 Nomor 1, April 2018
13	Sena Andhika dan Agus Jatnika Effendi , "Pemanfaatan Hasil Pengolahan Sludge Produced Water Industri Lng Sebagai Fertilizer Atau Pembenah Tanah,"	Jurnal Teknik Lingkungan FTSL-ITB, Volume 24 Nomor 2, Oktober 2018

V.4. Dalam prosiding seminar internasional

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama Seminar
1.	Effendi, A.J. , Q. Helmy, P.S. Hoesni and T. Tedjakusuma, "The Optimization of Bioemulsifier Production from <i>Azotobacter vinelandii</i> ",	6th International Workshop on Water dynamics, 4-6 March 2009, Sendai Japan
2	Dewi K., Effendi A.J. , Syam D.A., "CO ₂ Sequestration, Reuse of Solid Waste of Carbide Welding Process for Mineral Carbonation",	Proceeding of The 2nd International Symposium of Novel Carbon Resource Science, Earth Resource Science and Technology, Joint Symposium Kyushu University - ITB, 10-11 Maret 2009, Bandung
3	Effendi.A.J. , Q. Helmy,., P.S. Hoesni., T.Tedjakusuma "The Application of Bioemulsifier Produced by <i>Azotobacter vinelandii</i> in Bioremediation Oil-Contaminated Soil"	The 1st International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing Countries
4	Syarif Kurniawan., Agus jatnika Effendi. , Idris Maxdoni Kamil " <i>Environmental Economic Study of Acid Mine Drainage Management Using Cost Benefit Analysis Approach (Case Study: Coal Mine Area of PT.TAL in South Sumatra)</i> ",	The 1st International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment in Developing Countries, November, 2-3, 2009, Bandung, West Java, Indonesia
5	Agus Jatnika Effendi and Yodi Ilyas, "Improvement of Oil-Contaminated Soil Bioremediation by the Addition of Bio-surfactant Producing Bacteria Varied with Bulking Agents"	The 6th International Symposium on "Novel Carbon Resource Scienes" Aiming roward Low-Carbon Society 12-13 Nov 2010 Fukuoka, Japan
6	Puti Sri Komala, Agus Jatnika Effendi , IG. Wenten, Wisjnuaprpto, "Performance of anoxic-oxic membrane bioreactor for Azo dye biodegradation", The 8th International Conference on Membrane Science and Technology "	Sustainable Technology for Water and Wastewater Treatment, Energy and Environment, 29th Nov – 1st Dec 2010

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama Seminar
7	Juli Rusjanto, Gayatri Asmaradewi, Dian Safitri and Agus Jatnika , "Enhancing Bioremediation of Oily Waste by Bioaugmentation",	IPTC 2012: International Petroleum Technology Conference, 7 February 2012
8	Puti Sri Komala., Agus Jatnika Effendi. , IG. Wenten., Wisjnuprpto, "Performance Changes of Aerobic-Anoxic Membrane Bioreactor for Azo Dye Biodegradation Under Different Hydraulic Retention Time In Anoxic Tank"	International Conference on Construction Industry, Facilities and Asset Management, November 2012 , Padang - Indonesia,
9	Thye Yoke Pean, T., Agus Jatnika Efendi. , Prayatni Soewondo., Damir Brdjanovic and, Tjandra Setiadi, "Impact of Earthquakes on Excreta Disposal Needs: A Case Study of the 2006 Yogyakarta Earthquake"	The Second International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment (SIBE 2013), 19-20 Nov 2013, Bandung Indonesia
10	Dyah.W.P., Prayatni S., Agus J.E. , and Tjandra S., "Existing Application of Wastewater Infrastructure for Coastal, River, and Swamp Communities" (Review Paper	The Second International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment (SIBE 2013), 19-20 Nov 2013, Bandung, Indonesia
11	D.W.Putri., A J.Effendi , P.Soewondo, and T. Setiadi, "A Review : Finding solution for treating wastewater from floating toilet"	The first Joint Seminar of ITB - FCEE and Gifu, Toyota and Numazu National Colleges of Technology Jaman in Environmental Sustainability and Disaster Prevention-Part of The Second Internasional Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment, Bandung, 21 Nov 2013
12	Yoke P. Thye, Agus J. Effendi , P. Soewondo, D. Brdjanovic "Function Feature Analysis Of Emergency Sanitation Technologies Towards Systematic Innovation", Sustainable Water and Sanitation Services for all in a Fast Changing Word	Proceeding of the 37th WEDC International Conference, Loughborough University, 2014, 15-19 Sep 2014 Hanoi , Vietnam
13	H Hasaya., YP Thye., AJ Effendi. , P Soewondo., D Brdjanovic., T Setiadi, "Emergency toilets for the people affected the Mount Sinabung eruptions"	37th WEDC International Conference. Hanoi, Vietnam. Water, Engineering and Development Centre (WEDC), 2014
14	Agus Jatnika Effendi. , Mahesa Gilang A.P, "Bulking Agent Variation in Aerated Static Pile Method for Sludge Produced Water Utilization as Soil Ameliorant"	7th Asean Environmental Engineering Conference 21-22 November 2014, AUN SEED-Net Jica, Palawan, Philippines ISBN 978-616-374-596-5
15	Marita Wulandari, Agus Jatnika Effendi , "Effect of frequency and ratio solid liquid on ultrasonic remediation of petroleum contaminated soil"	AIP Conference Proceedings 2014, 020120 (2018)
16	Agus Jatnika Effendi. , Puti Sri Komala., Dini Adyasari., I Gede Wenten and Wisjnuprpto, "Population Dynamics of Bacteria in an Anoxic-Aerobic Membrane Bioreactor in the Biodegradation of Azo Dyes"	International Conference on Sustainable Initiatives (ICSI), 8th, Asean Environmental Engineering Conference (AEEC), 24-25 August 2015, Anjung Menara Razak UTM Kuala Lumpur

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama Seminar
17	Yoke P. Thye Y.P., Effendi, A.J. , Soewondo., P., Brdjanovic, D and Setiadi, T., "Survey On The Implementation Of Tools To Support The Development Of Emergency Sabitation Products",	The 5th Environmental Technology and Management Conference Green Technology Towards Sustainable Environment, 23-24 Nov 2015, Bandung
18	D.W. Putri, D. F. Marlisa, D.A. Kusumaningayu, A.J. Effendi , P. Soewondo, and T. Setiadi, "Organic Substance removal Using Modified Tripikon_s System",	The 5th Environmental Technology and Management Conference Green Technology Towards Sustainable Environment, 23-24 Nov 2015, Bandung
19	Muchlis Hasan., Agus Jatnika Effendi , "Biogas desulphurization by iron oxide impregnated coco coir in laboratory scale fixed bed reactor",	Proceeding - 2015 International Conference On Sustainable Energy Engineering and Application: (ICSEEA). , 5-7 October 2015
20	Agus Jatnika Effendi , "Enhancing Bioremediation Process by Increasing Bio-availability of the Contaminant (Case : Crude Oil Contaminated Soil Bioremediation)",	The 6th International Conference On Mathematics and Natural Sciences (ICMNS) 2016, 2 -3 Nov 2016 ITB - Bandung Indonesia
21	Bimastyaji Surya Ramadan., Agus Jatnika Effendi and Qomarudin Helmy, "Integrating Electrokinetic and Bioremediation Process for Treating Oil Contaminated Low Permeability Soil"	E3S Web of Conferences Volume 31, 21 February 2018, 2nd International Conference on Energy, Environmental and Information System, ICENIS 2017
22	Agus Jatnika Effendi. , Roopa Kamath., Jamal Syakir., Sara McMillen., Natasha Sihota., Eve Zuo., Kammy Sra., Deyuan Kong.,Tri Wisono., "Strategies for Enhancing Bioremediation for Hydrocarbon - Impacted Soils"	Publication Name : Society of Petroleum Engineers - SPE Asia Pacific Health, Safety, Security, Environment and Social R vol. , 2017
23	Agus Jatnika Effendi. ,Marita Wulandari, "The impact of ultrasonic power and time for the removal of Total Petroleum Hydrocarbon from low permeability contaminated soils"	The 1st International Conference on Environmental Sciences (ICES2018), IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 314 (2019)
24	R Leapheng, A J Effendi , and Q Helmy, "Potential of Soil Amendments and Jatropha Curcas Plant in the Remediation of Heavy Metals Contaminated AgriculturalLand"	International Conference on Science and Innovated Engineering (I-COSINE), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 536 (2019)
25	Agus Jatnika Effendi , Vina Lestari., Mohammad Irsyad, "Optimizing soil washing remediation of mercury contaminated soil using various washing solutions and solid/liquid ratios"	The 6th Environmental Technology and Management Conference (ETMC) in conjunction with The 12th AUN/SEED-Net Regional Conference on Environmental Engineering (RC EnvE) 2019
26	Budihardjo, M.A., Safitri, R.P., Ramadan, B.S., ...Ratnawati, B., Karmilia, A., Effendi, A.J. , Hidayat, S., "A bibliometric analysis of permeable reactive barrier	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 894(1), 01203

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama Seminar
	enhanced electrokinetic treatment for sustainable polluted soil remediation"	
27	Prihatinngtyas, E., Effendi, A.J. , "Performance of natural coagulant extracted from tapioca and corn flour for the treatment of tofu wastewater"	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1062(1), 012030
28	Paramitadevi, Y.V., Ratnawati, B., Effendi, A.J. , Budihardjo, M.A., Ramadan, B.S., "Environmental Footprint Analysis Tools of Electrokinetic Remediation (EKR): A Bibliometric View of the Literature"	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 950(1), 012049

V.5. Dalam prosiding seminar nasional

No.	Pengarang; Judul makalah	Nama Seminar
1	Puti Sri Komala., Agus Jatnika Effendi. , IG Wenten., Wisjnuaprpto (2010), "Kinerja Biodegradasi Zat Warna Azo Menggunakan Bioreaktor Membran Anoksik-oksik Kontinu pada Umur Lumpur yang Berbeda"	Prosiding Seminar Tjipto Utomo Vol. 7 Tahun 2010
2	Puti Sri Komala, A.J. Effendi , IG. Wenten, Wisjnuaprpto."Pengaruh pH terhadap biodegradasi zat warna Azo menggunakan bioreaktor membran aerob-anaerob"	Seminar Nasional Penelitian Masalah Lingkungan di Indonesia 2010, Denpasar, 29 Juli 2010
3	Puti Sri Komala, A.J. Effendi , IG. Wenten, Wisjnuaprpto, "Perbandingan Ko-substrat Optimum pada Sistem Batch dan Bioreaktor Membran Anoksik-osik Kontinu dalam Biodegradasi Zat Warna Azo"	Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardojo (STKS), 25-26 Okt 2010

VI Penelitian dengan sumber dana Hibah Kompetisi, Riset Unggulan dan lain- lain

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun; Tempat publikasi
1	Agus Jatnika Effendi , Wisjnuaprpto & I Gede Wenten. Pengembangan Bioreaktor Konsekutif Aerob-Anerob untuk Bidegradasi Zat Warna AZO dalam Limbah Industri Tekstil	Tahun 2008 - 2009. Hibah Bersaing – Direktorat Penelitian & Pengabdian pada Masyarakat – Kemenristek Dikti
2	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
3	Edwan Kardena & Agus Jatnika Effendi . Pengembangan Metoda Uji Cepat Sifat Biodegradasi untuk Berbagai Pewarna Azo	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 & Agus Jatnika Effendi . Pengembangan Reaktor Unggun Tetap Berbasis Mycotreatment untuk Penghilang Warna Limbah Cair Industri	Tahun 2016. Penelitian Terapan Unggulan Perguruan Tinggi - Ristekdikti

No.	Peneliti, Judul Penelitian	Sumber dana; Tahun; Tempat publikasi
6	Agus Jatnika Effendi & Syarif Hidayat. Pengolahan Lindi Sampah Sisa Makanan Menjadi Bioenergi Menggunakan Kombinasi Teknologi Microbial Recycling Cells (MRCs) dan Biochar	Tahun 2019. Program Penelitian Kolaborasi Insitusi – ITB dan Ristekdikti

VII. Pengabdian kepada Masyarakat (yang terkait bidang keahlian)

Kegiatan
- Wastewater Treatment Plant Evaluation in PT Toba Pulp Lestari, September 2021 – March 2022, PT LAPI ITB - Environmetal Management & Monotoring PT Pertamina PGE Kamojang Area tahun 2022 – 2025, Yayasan LAPI ITB - Feasibility Study of Segregated Refused Fuel (SRF) in Payakumbuh Regional Solid Waste Final Disposal, Environmental Engineering Expert, January – July 2021, PT Indonesia Power – Yayasan LAPI – ITB - Evaluation of Crude Oil Contaminated Soil and Groundwater in RDMP Project – Pertamina RU-V, Balikpapan, November 2019 – January 2020, Environmental Engineering Expert, PT Soilens - Acid Mine Treatment Plant Outline Design in PT Freeport Indonesia, March 2018 – December 2018, Team Leader, PT LAPI ITB - Identification & Mapping of Mercury Contamination Impact from Small Scale Gold Mining Activity to the Environmental, Health & Community Socio-economics, June-December 2018, Team Member, KLHK – LPPM ITB - Delineation & Treatment Technology Development of Mercury Contaminated Soil in Lebak Area, June – December 2018, Sub Team Leader, KLHK – LPPM ITB - Smoldering Remediation of HIS in PT CPI, Lead Observer of LAPI ITB, June 2017 – April 2018, LAPI ITB - Crude Oil Contaminated Soils (COCS) Delianeation Study, PT CPI, August 2016 – December 2017, Team Leader, PT GPI - Compliance Points Determination Study, PT Freeport Indonesia, August 2016 – December 2016, Environmental Engineer Expert, PT LAPI ITB - Enhanced Land-farming Bioremediation (Composting, Surfactant & Oxidation), PT CPI, July 2015-October 2016, Lead Researcher, LAPI ITB - Various Remediation Approaches for Treating Crude Oil Contaminated Soil (COCS), PT CPI, October 2014-January 2016, Lead Researcher, LAPI ITB - COCS Treatability Study using Surfactant and Bio-Augmented Bacteria, PT Total E&P, Team Leader, PT LAPI ITB, Nov 2014 – March 2015 - Technical Advisor for Bioremediation Process in PT CPI, November – December 2014, LAPI ITB - Improvement of Oil-Contaminated Soil Bioremediation Project, Total Indonesia, LAPI ITB, 2009 – 2011 - Bio-augmentation of oil-contaminated soil degrading bacteria, Total Indonesia E&P, LAPI – ITB, Agustus 2007 – April 2008, Team Leader - Sumatera Light Environmental Site Assessment (SLESA), PT CPI, Riau, LAPI – ITB & ERM Indonesia, January 2006 – December 2006, Project Manager - Air Emission Monitoring from CGS & CVCS activities in PT CPI, June – December 2006, LAPI ITB, Team Leader - Bioremediation of oil-contaminated soil in Pertamina UP II Dumai, LAPI ITB, October 2005 – April 2006, Team leader - Technical Assistance for Bioremediation of Oil Contaminated Soil in PT KPC, Sangatta, LAPI ITB, December 2005 – December 2006 - Bekasap Environmental Study Assessment (BESA) Phase I, PT CPI, Duri, LAPI-ITB, December 2003 – July 2004, Project Manager

- Bioremediation of oil-contaminated soil at Senipah, PT TotalFinaElf E & P Indonesia & Environmental Engineering Department ITB, 2001-2003. ITB Coordinator
- Environmental Property Transfer of Coastal Plain Pekanbaru (CPP) Block in Caltex Field, Riau. LAPI ITB and PT Caltex Pacific Indonesia, 2001-2002. Environmental Team Coordinator

VIII. Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya 20 tahun	Pemerintah RI	2013
2.	Lencana Penghargaan 25 Tahun -ITB	ITB	2018
3.	Karya Inovasi	ITB	2020

IX. Jejaring Kerjasama yang sudah dibangun

No.	Kegiatan	Nama Mitra (institusi/individu)	Tahun
1.	Integrated Water Resource Management (IWRM)	International Centre of Excellent in Water Resource Management (ICE WaRM) - Australia	2009 - 2010
2.	ASEAN University Network (Environmental Engineering Contact Person)	AUNSeed-Net – JICA Japan	2017 – Now
3.	Technical Exchange in Remediation Technology	Shimizu Corporation - Japan	2021 - Now

X. Lain-Lain

No.	Kegiatan	Tempat	Tahun
1.	Ketua Tim Penyusun dan Pendirian Program Studi Rekayasa Infrastruktur Lingkungan (RIL) - ITB	ITB	2011-2012



📍 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 978-623-297-291-9

