



FORUM GURU BESAR
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung



MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY (MEOR)

**Aplikasi Mikroba untuk Peningkatan Produksi
Minyak Bumi Indonesia yang Berkelanjutan**

Profesor Dea Indriani Astuti

**Sekolah Ilmu dan Teknologi Hayati
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB
20 Juli 2024**

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

***MICROBIAL ENHANCED OIL
RECOVERY (MEOR)***

Aplikasi Mikroba untuk Peningkatan Produksi Minyak Bumi
Indonesia yang Berkelanjutan

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY (MEOR)

Aplikasi Mikroba untuk Peningkatan Produksi Minyak Bumi
Indonesia yang Berkelanjutan

Prof. Dea Indiriani Astuti

20 Juli 2024
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin tertulis dan resmi dari penerbit.

Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:

Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR):

Aplikasi Mikroba untuk Peningkatan Produksi Minyak Bumi Indonesia yang Berkelanjutan

Penulis : Prof. Dea Indiriani Astuti

Reviewer : Prof. Pingkan Aditiawati

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-503-3

e-ISBN : 978-623-297-504-0 (PDF)

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 kepada Allah Swt., atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Naskah orasi ilmiah ini menceritakan perjalanan suatu penelitian, yang dimulai dari penelitian dasar di laboratorium mengenai mikroba pengguna hidrokarbon hingga dapat dikembangkan kearah aplikasinya. Pembahasan dititikberatkan pada pengalaman dalam melakukan peningkatan perolehan minyak bumi dengan menggunakan teknologi *Microbial Enhanced Oil Recovery*.

Penelitian mengenai *Mikrobiologi Minyak Bumi* ini diawali dengan ketertarikan terhadap bagaimana mikroba, khususnya bakteri dapat tumbuh pada substrat hidrokarbon yang sebetulnya cukup sulit digunakan oleh mikroba. Banyak aspek hambatan fisik maupun fisiologis yang harus diatasi oleh mikroba untuk dapat menggunakan substrat hidrokarbon yang tidak larut dalam air. Penelitian diawali dari isolasi dan karakterisasi isolat mikroba hidrokarbonoklastik dan selanjutnya berkembang menjadi penelitian yang lebih kompleks dan mengarah pada pemanfaatannya di industri. Penelitian ini telah dilakukan selama kurang lebih 20 tahun untuk kemudian sampai pada tahapan aplikasi penginjeksian mikroba di sumur minyak bumi untuk meningkatkan perolehan minyak bumi. Banyak tantangan yang dihadapi dalam mewujudkan penelitian ini untuk sampai kemudian dapat digunakan oleh industri. Dengan adanya peta jalan penelitian yang terarah, kerja sama yang baik dengan para peneliti dari berbagai bidang keilmuan, serta kepercayaan dari industri untuk mencoba mengaplikasikan teknologi yang dikembangkan di laboratorium, pada akhirnya dapat memberikan hasil yang dapat dirasakan oleh masyarakat luas. Masih cukup banyak tantangan ke depan terkait MEOR, yang menjadikan bidang ini selalu menarik untuk terus dikembangkan agar dapat memberikan manfaat yang lebih besar di kemudian hari.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar besarnya kepada ketua dan anggota Forum Guru Besar (FGB) Institut Teknologi Bandung atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah ini. Ucapan terima kasih dihaturkan pula kepada Prof. Dr. Pingkan Aditiawati atas masukan yang

berharga dalam penyempurnaan naskah ini. Terima kasih juga disampaikan kepada Dr. Kamarisima yang membantu menyiapkan naskah ini.

Semoga tulisan mengenai perkembangan *Mikrobiologi Minyak Bumi* di Indonesia dan ITB khususnya dapat menambah wawasan dan dapat memberikan manfaat bagi masyarakat di Indonesia maupun dunia.

Bandung, 20 Juni 2024

Prof. Dea Indiriani Astuti

SINOPSIS

Mikrobiologi Minyak Bumi merupakan cabang dari Mikrobiologi yang membahas mengenai mikroba yang dapat memetabolisme hidrokarbon atau produk-produk minyak bumi lainnya. Substrat hidrokarbon ini bukan merupakan substrat yang mudah digunakan oleh mikroba karena sifatnya yang tidak larut dalam air sehingga sulit untuk dapat masuk ke dalam sel mikroba. Mikroba harus menempel/kontak dengan hidrokarbon, dan selanjutnya enzim yang terletak/terikat di dalam membran sel akan bekerja untuk memetabolisme hidrokarbon menggunakannya sebagai sumber karbon dan energi untuk pertumbuhan mikroba. Perkembangan terakhir dalam biologi molekuler telah memperluas pemahaman mengenai proses metabolisme yang terkait dengan transformasi hidrokarbon oleh mikroba. Respons fisiologi dari mikroba terhadap adanya hidrokarbon di antaranya melibatkan perubahan pada permukaan sel dan mekanisme adaptif untuk dapat mengambil hidrokarbon dari lingkungan serta bagaimana *efflux* dari substrat ini juga telah dapat dikarakterisasi. Teknik-teknik molekuler juga telah meningkatkan pemahaman terhadap dinamika komunitas mikroba di dalam ekosistem yang terdedah dengan minyak bumi.

Pemahaman mengenai metabolisme mikroba pada substrat hidrokarbon membawa pada berbagai aplikasi dari mikroba hidrokarbonoklastik ini. Aplikasi awalnya lebih ditekankan pada pemanfaatan mikroba ini untuk bioremediasi lingkungan tercemar minyak bumi. Aplikasi lain yang berkembang selanjutnya adalah pemanfaatan mikroba ini di industri perminyakan, yaitu untuk meningkatkan perolehan minyak bumi, atau yang dikenal sebagai MEOR (*Microbial Enhanced Oil Recovery*). Prinsip utama dari MEOR ini adalah dengan memanfaatkan kemampuan mikroba dalam memetabolisme minyak bumi sehingga minyak bumi menjadi lebih mudah dimobilisasi dari sumur, dan pada akhirnya meningkatkan perolehan minyak bumi.

Teknik yang dapat digunakan dalam MEOR adalah bioaugmentasi (injeksi mikroba dan/atau produk mikroba) serta biostimulasi (injeksi nutrisi). Pemilihan kedua metode ini untuk MEOR sangat dipengaruhi oleh kondisi sumur di mana MEOR ini akan dilakukan. Mikroba dan nutrisi yang

diinjeksikan ke dalam sumur minyak bumi akan meningkatkan pertumbuhan mikroba *in-situ* dan dapat menyebabkan mobilisasi minyak ke arah sumur produksi melalui perubahan pada kondisi fisika-kimia minyak bumi yang terjadi akibat metabolisme mikroba, di antaranya perubahan tegangan permukaan, penurunan viskositas minyak, *selective plugging* pada zona permeabel, peningkatan porositas dan permeabilitas batuan, dan sebagainya.

Teknologi ini memerlukan pertimbangan sifat fisika-kimia sumur minyak bumi seperti salinitas, pH, suhu, tekanan, dan ketersediaan nutrisi, sehingga mikroba yang digunakan untuk MEOR umumnya bersifat *site-specific*. Hanya bakteri yang dapat menjadi kandidat mikroba yang baik untuk MEOR. Hal ini terkait dengan kemampuan bakteri untuk tumbuh pada kondisi sumur minyak bumi yang cukup ekstrem bagi mikroba lainnya. Dengan demikian isolasi, karakterisasi, dan pemilihan mikroba dari sumur minyak bumi memegang peranan penting dalam keberhasilan aplikasi MEOR. Mikroba *in-situ* yang distimulasi dengan penambahan nutrisi maupun mikroba yang diinjeksikan ke dalam sumur minyak bumi harus dapat mengubah dinamika mikroba di dalam sumur minyak bumi ke arah populasi mikroba yang memberikan dampak positif terhadap perolehan minyak bumi, dan tidak menstimulasi pertumbuhan kelompok mikroba yang merugikan/ memberikan dampak negatif terhadap perolehan minyak bumi, seperti reservoir souring, peningkatan viskositas minyak bumi, dan sebagainya.

Dalam riset MEOR ITB ini, teknologi dapat diimplementasikan di lapangan karena adanya kerja sama dengan berbagai disiplin ilmu lainnya. Suatu riset konsorsium yang kuat yang terdiri dari peneliti dari berbagai bidang keilmuan dan juga dengan industri, diperlukan agar teknologi ini dapat digunakan dan dapat menjawab tantangan nyata di industri serta memberikan manfaat yang besar untuk masyarakat.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR.....	XI
DAFTAR TABEL.....	XV
1 TANTANGAN PRODUKSI MINYAK BUMI DAN PERAN MEOR	1
1.1 <i>Microbial Enhanced Oil Recovery</i> (MEOR)	3
1.2 Karakterisasi Mikroba untuk Aplikasi MEOR	5
1.3 Karakterisasi Sumur Minyak untuk Aplikasi MEOR	7
1.4 Mekanisme Kerja MEOR.....	9
2 KAJIAN APLIKASI MEOR SKALA LABORATORIUM DAN PENGEMBANGANNYA.....	13
2.1 Isolasi dan Penapisan Mikroba Hidrokarbonoklastik untuk Aplikasi MEOR.....	13
2.2 Optimasi Produksi Bakteri Penghasil Biosurfaktan untuk Aplikasi MEOR.....	14
2.3 Peningkatan Kemampuan Bakteri Penghasil Biosurfaktan dengan Pendekatan <i>Adaptive Laboratory Evolution</i> (ALE).....	16
2.4 Simulasi Aplikasi MEOR dengan Skala Laboratorium	19
3 KAJIAN APLIKASI MEOR SKALA LAPANGAN DAN TANTANGANNYA	23
3.1 Persiapan Analisis Kesiapan Sumur Minyak Bumi untuk Aplikasi MEOR	23
3.2 Aplikasi MEOR dengan Pendekatan Bioaugmentasi.....	24
3.3 Aplikasi MEOR dengan Pendekatan Biostimulasi	30
4 TANTANGAN APLIKASI MEOR DI MASA DEPAN.....	41
5 UCAPAN TERIMA KASIH	43
DAFTAR PUSTAKA	45
CURRICULUM VITAE	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Metode perolehan minyak bumi	1
Gambar 1.2	Sebaran lokasi sumur minyak bumi di Indonesia yang telah dilakukan studi potensi aplikasi MEOR dalam skala laboratorium (warna hitam) dan skala lapangan dengan pendekatan biostimulasi (warna merah) dan bioaugmentasi (warna biru).....	2
Gambar 1.2	Pola mekanisme kerja MEOR dapat dikelompokkan menjadi 3: degradasi senyawa hidrokarbon (zona A), <i>microbial enhanced water flooding</i> (zona B), dan <i>selective plugging</i> (zona C) (Youssef et al., 2009).....	10
Gambar 1.3	Skema aplikasi MEOR dengan pendekatan (a) <i>microbial flooding</i> dan (b) <i>Huff and Puff</i>	11
Gambar 2.1	Perubahan fraksi SARA setelah 7 hari penambahan isolat bakteri potensial untuk aplikasi MEOR pada media SMSS dengan minyak bumi mentah sebagai sumber karbon (Astuti et al., 2017).	13
Gambar 2.2	Perubahan tekanan permukaan minyak bumi setelah 7 hari penambahan isolat bakteri potensial untuk aplikasi MEOR pada media SMSS dengan minyak bumi mentah sebagai sumber karbon (Astuti et al., 2017).	14
Gambar 2.3	Spektrum analisis FTIR dari biosurfaktan yang diproduksi oleh <i>Pseudoxanthomonas</i> sp. G3 (Astuti et al., 2019).	15
Gambar 2.4	Hasil uji stabilitas biosurfaktan oleh <i>Pseudoxanthomonas</i> sp. G3 dengan pendekatan Response surface methodology (Box bhenken design) menggunakan 3 faktor (suhu, pH, dan salinitas) (Astuti et al., 2019).....	16
Gambar 2.5	<i>Spot dilution assay</i> untuk menentukan pengaruh konsentrasi CTAB terhadap isolate bakteri hidrokarbonoklastik ABG2 pada agar LB, 50 °C selama 24 jam (Astuti et al. 2022).	17

Gambar 2.6.	Spektrum analisis FTIR dari biosurfaktan yang diproduksi oleh galur WT, mutan KG7' dan surfaktin (Astuti et al. 2022).	18
Gambar 2.7	Rancangan simulasi aplikasi MEOR dengan uji imbibisi. (a) skema alat, (b) pengujian dalam laboratorium, (c) hasil perolehan minyak bumi dengan MEOR (kanan) dibandingkan dengan kontrol (kiri) dengan menggunakan sampel minyak bumi dari sumur Mangunjaya (MJ-122) (Ariadji et al., 2017).	20
Gambar 3.1	Foto penempatan unit injeksi MEOR dengan bioaugmentasi pada sumur MJ-122 (bekerja sama dengan AIMTOP (Ariadji et al., 2017).....	25
Gambar 3.2	Diagram alir proses aplikasi MEOR dengan bioaugmentasi di Mangunjaya, Sumatra Selatan (Ariadji et al., 2017).	25
Gambar 3.2	Profil kromatogram GC/MS fraksi hidrokarbon minyak bumi (a) sebelum dan (b) setelah aplikasi MEOR setelah 6 bulan pada sumur minyak MJ-122 (Ariadji et al., 2017).....	26
Gambar 3.3	Hasil pemantauan konsentrasi bakteri dan <i>watercut</i> pada sumur MJ-122 selama aplikasi MEOR dengan bioaugmentasi (Ariadji et al., 2017).	28
Gambar 3.4	Hasil pemantauan kinerja MEOR dengan bioaugmentasi berdasarkan <i>watercut</i> terhadap kapasitas produksi kotor sebelum (biru) dan setelah 3 bulan implementasi (merah) di lapangan Mangunjaya (MJ-122) (Ariadji et al., 2017).....	29
Gambar 3.5	Hasil pemantauan kinerja MEOR dengan bioaugmentasi berdasarkan kumulatif minyak terhadap kapasitas produksi kotor sebelum (merah) dan setelah 3 bulan implementasi (biru) di lapangan Mangunjaya (MJ-122) (Ariadji et al., 2017).	30
Gambar 3.6	Hasil formulasi nutrisi injeksi MEOR dengan pendekatan RSM metode CCD tiga faktor (molase, NPK, DAP) terhadap respons viskositas minyak bumi (Astuti et al., 2021).	31

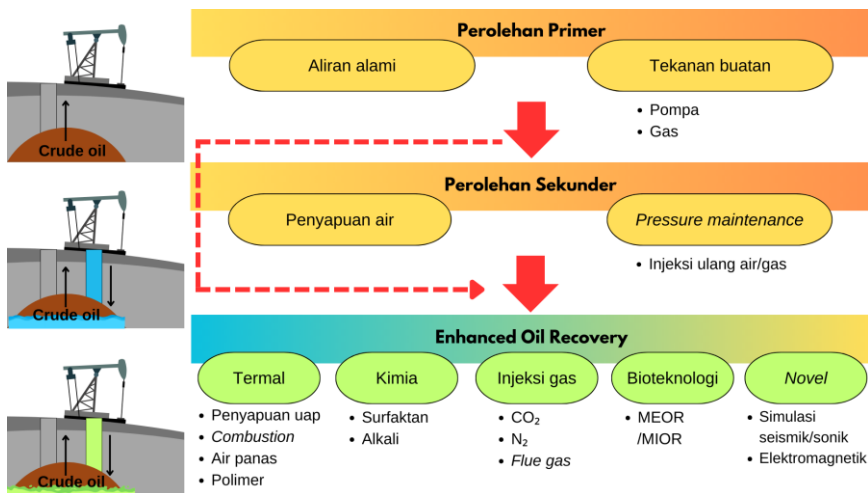
Gambar 3.7	Total kapasitas produksi kotor, <i>watercut</i> , dan minyak yang diperoleh di sumur B2 sebelum dan setelah biostimulasi (Ariadji et al., 2020).	33
Gambar 3.8	Perubahan komposisi fraksi minyak bumi selama periode pemantauan; S: saturated, Ar: aromatic, R: resinic, As: Asphaltic, V: viscosity (Astuti et al., 2021).....	34
Gambar 3.9	Hasil monitoring kelimpahan bakteri terkultur selama aplikasi MEOR dengan bioaugmentasi di lapangan Bentayan. (Ket: Ae: bakteri aerobic; An: bakteri anaerobic; S: bakteri SRB, H: bakteri hidrokarbonoklastik; M: minggu ke-) (Astuti et al., 2022).	36
Gambar 3.10	Perubahan komposisi komunitas bakteri di dalam sumur minyak bumi selama periode pemantauan selama biostimulasi di Lapangan Bentayan selama 3 bulan (M: minggu ke-) (Astuti et al., 2021).	38

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Ringkasan keuntungan dan kerugian teknologi MEOR dibandingkan teknologi EOR lainnya4
Tabel 1.2	Klasifikasi mikroba petrofilik berdasarkan bioproduk yang dihasilkan dan peranannya dalam MEOR6
Tabel 1.3	Jenis mikroba dan bioproduk yang berperan dalam aplikasi MEOR7
Tabel 1.4	Karakteristik sumur minyak bumi untuk aplikasi MEOR berdasarkan Aldasani dan Bai (2010) dan Bryant (1991).8
Tabel 2.1	Hasil profil produksi dan kemampuan emulsifikasi dari bakteri penghasil biosurfaktan WT, mutan KG7'a dan KG7'b dalam media SMSS + 5% (v/v) minyak bumi (Astuti et al., 2022)..... 18
Tabel 2.2	Hasil perolehan minyak bumi dari simulasi MEOR skala laboratorium dengan menggunakan <i>sand-packed column</i> menggunakan <i>brine flooding</i> dan ekstrak biosurfaktan dari <i>Pseudoxanthomonas</i> sp. G3 (Astuti et al., 2019). 19
Tabel 2.3	Hasil perolehan minyak bumi dari simulasi MEOR (bioaugmentasi) skala laboratorium dengan uji imbibisi pada berbagai sampel minyak dari Mangunjaya (Ariadji et al., 2017). 21
Tabel 3.1	Hasil skrining lapangan Mangunjaya dan Bentayan berdasarkan Aladasani dan Bai (2010), dan Bryant, 1990 (Ariadji, et al. 2020) 23
Tabel 3.2	Hasil analisis degradasi fraksi hidrokarbon selama proses aplikasi MEOR dengan bioagumentasi pada sumur minyak MJ-122 (Ariadji et al., 2017). 27

1 TANTANGAN PRODUKSI MINYAK BUMI DAN PERAN MEOR

Konsumsi minyak bumi saat ini masih menempati peringkat pertama dalam penggunaan bahan bakar fosil (selain batu bara dan gas alam) dan tren ini selalu meningkat dimulai dari tahun 1970. Konsumsi minyak bumi sebagai bahan bakar tidak terbaharukan ini tidak sebanding dengan cadangan minyak bumi dunia yang semakin menipis. Hal ini menyebabkan harga minyak dunia yang semakin tinggi dari tahun ke tahun. Selain itu, eksplorasi sumur produksi yang baru juga membutuhkan biaya yang besar. Oleh karena itu eksploitasi minyak bumi yang ada perlu dioptimalkan. Berbagai metode telah banyak dilakukan saat ini untuk meningkatkan perolehan minyak bumi yang dikenal sebagai *enhanced oil recovery* (EOR). Pada umumnya metode EOR yang dilakukan terdapat beberapa pendekatan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1.1. *Residual oil* merupakan target utama EOR tersier, salah satunya dengan memanfaatkan mikroba yang dikenal sebagai *Microbial enhanced oil recovery* (MEOR) (Brown 2010).



Gambar 1.1 Metode perolehan minyak bumi

Mikroba pada MEOR berperan dalam menghasilkan metabolit yang mampu meningkatkan perolehan minyak bumi, dengan menghasilkan berbagai metabolit seperti: surfaktan, polimer, pelarut, asam, dan gas. Produk metabolit yang dihasilkan mikroba ini mengubah karakteristik minyak bumi di dalam *reservoir*, seperti: pembentukan emulsi minyak-air yang stabil,

mempermudah mobilisasi minyak residu sebagai akibat penurunan tegangan antarmuka, pembentukan gas dalam *reservoir* serta mengeluarkan minyak yang terjebak di pori-pori batuan. Teknologi ini semakin berkembang karena memiliki performa peningkatan perolehan minyak yang baik, ramah bagi lingkungan, dan biaya operasional yang lebih rendah. Terdapat tiga jenis teknik aplikasi MEOR, yaitu dengan: menginjeksikan mikroba (bioaugmentasi), menginjeksikan nutrisi (biostimulasi), dan menginjeksikan metabolit mikroba (bioproduk). Penelitian MEOR di ITB sendiri sudah berlangsung sejak tahun 1996 dan terus berkembang hingga sekarang. Penelitian MEOR yang dikembangkan di ITB merupakan kolaborasi keilmuan multidisiplin yang melibatkan berbagai rumpun keilmuan seperti: Mikrobiologi, Matematika, Teknik perminyakan, Teknik Kimia (Bioproses), dll.. Penelitian MEOR yang dikembangkan di ITB mencakup penelitian dasar hingga penelitian terapan. Kajian studi MEOR yang dilakukan juga telah menganalisis berbagai sumur minyak yang berada di beberapa pulau penghasil minyak terbesar di Indonesia, seperti: Pulau Kalimantan, Pulau Jawa, dan Pulau Sumatra (Gambar 1.2). Secara khusus, teknologi MEOR dengan pendampingan tim ITB juga telah diimplementasikan, mulai tahun 2015, pada beberapa sumur minyak di Bentayan dan Mangunjaya. Berbagai pencapaian hasil dan juga tantangan aplikasi MEOR lebih lanjut akan dikaji pada tulisan ini.



Gambar 1.2 Sebaran lokasi sumur minyak bumi di Indonesia yang telah dilakukan studi potensi aplikasi MEOR dalam skala laboratorium (warna hitam) dan skala lapangan dengan pendekatan biostimulasi (warna merah) dan bioaugmentasi (warna biru).

1.1 *Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)*

Secara tradisional, pengambilan minyak bumi dapat dilakukan dengan dua tahapan, yaitu tahapan perolehan primer dan sekunder. Pada teknologi perolehan primer, penggunaan tekanan formasi digunakan untuk mengekstrak minyak dan gas dari reservoir minyak bumi dengan laju *recovery* sekitar 5-10% dari *original oil in place*. Pada tahap kedua, dilakukan peningkatan tekanan *reservoir* dengan menginjeksikan gas atau air ke dalam reservoir untuk menggantikan energi *elastic* dari batuan dan fluida dengan laju *recovery* berkisar antara 10-40% dari *original oil in place* (Hadia et al., 2019; Patel et al., 2015, Wu et al., 2022).

Meskipun telah dilakukan pengambilan minyak mentah dengan kedua cara di atas (perolehan primer dan sekunder), lebih dari 60% minyak mentah masih terperangkap di dalam reservoir (Wang et al., 2022; Niu et al., 2020). Oleh karena itu berbagai teknologi perolehan tersier (baik secara fisika, kimia maupun biologi) digunakan untuk meningkatkan mobilitas minyak di dalam *reservoir* sehingga dapat meningkatkan perolehan minyak bumi. *Gas enhanced oil recovery* (GEOR) dan *Chemical enhanced oil recovery* (CEOR) merupakan metode yang cukup populer untuk meningkatkan perolehan pada teknologi *tertiary oil recovery* (Hadia et al., 2019). Walaupun demikian, kedua metode ini bersifat *cost-effective* dan juga merupakan teknologi yang berisiko tinggi bahkan dapat melibatkan senyawa kimia toksik yang berpotensi membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia. Dalam tahun-tahun terakhir ini, dengan adanya penurunan harga minyak, teknologi ekstraksi minyak bumi yang ekonomis dan efisien menjadi sangat diperlukan.

Microbial enhanced oil recovery (MEOR) menjadi salah satu alternatif teknologi perolehan tersier yang menarik untuk dikembangkan karena memiliki kelebihan bersifat ramah lingkungan dan *low-cost* (Wu et al., 2022). MEOR merupakan salah satu pendekatan yang dilakukan dalam teknologi *tertiary oil recovery* dengan menggunakan mikroba dan metabolitnya seperti biopolimer, biosurfaktan, enzim, biogas, pelarut, dll., untuk memodifikasi/ mengubah karakteristik dari minyak bumi yang ada di *reservoir* sehingga dapat meningkatkan *recovery* atau perolehan dari minyak tersebut (Niu et al., 2020; Patel et al., 2015). Tentu saja pertumbuhan mikroba di dalam sumur minyak bumi dapat memberikan dampak positif maupun negatif, sehingga pemahaman mengenai metabolisme serta pertumbuhan mikroba di dalam

sumur minyak bumi masih perlu banyak dipelajari untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik.

Sejauh ini dapat diketahui beberapa manfaat maupun juga dampak negatif dari pertumbuhan mikroba di dalam sumur minyak bumi. Dampak positif/menguntungkan dari mekanisme pertumbuhan mikroba dalam substrat hidrokarbon adalah terjadinya biodegradasi dari molekul yang besar yang menyebabkan penurunan viskositas minyak bumi, penurunan tegangan permukaan akibat adanya produksi biosurfaktan, terbentuknya *additional pressure driving force* akibat terjadinya produksi gas, serta perubahan permeabilitas melalui pengaktifkan jalur aliran sekunder minyak bumi yang disebabkan oleh dihasilkan metabolit oleh mikroba. Sementara beberapa dampak negatif yang sudah diketahui adalah dihasilkannya hydrogen sulfida, yaitu senyawa yang dapat menyebabkan korosi dari pipa dan mesin yang digunakan dalam produksi minyak bumi, selain itu konsumsi hidrokarbon oleh bakteri juga dapat mengurangi produksi beberapa senyawa kimia tertentu di dalam minyak bumi yang diinginkan.

Secara umum keuntungan maupun kerugian dari teknologi MEOR seperti yang diuraikan dalam Tabel 1.1. Metabolit mikroba digunakan untuk mengurangi tegangan permukaan antara air formasi dan minyak, menurunkan viskositas minyak, dan meningkatkan permeabilitas batuan reservoir. Implementasi MEOR lebih murah, lebih efektif daripada teknik EOR lainnya, ramah lingkungan, dan dapat diterapkan pada reservoir dengan jenis batuan karbonat (Guo dkk., 2015; Lazar dkk., 2007; Niu dkk., 2020).

Tabel 1.1 Ringkasan keuntungan dan kerugian teknologi MEOR dibandingkan teknologi EOR lainnya

Keuntungan	Kerugian
Menginjeksikan mikroba dan nutrisi relatif murah, mudah penanganan di lapangan dan tidak bergantung dengan harga minyak	Oksigen yang diinjeksikan pada MEOR aerob dapat berfungsi sebagai agen korosif pada peralatan dan pipa-pipa yang tidak resisten
Secara ekonomi menarik bagi ladang minyak yang sudah tua sebelum ditinggalkan	Aplikasi MEOR secara anaerobik membutuhkan volume nutrisi berupa gula sederhana yang besar, sehingga menjadi kendala logistik pada aplikasi skala besar di lapangan.
Input energi yang diperlukan agar mikroba bisa menghasilkan agen MEOR rendah	Mikroba eksogen (mikroba yang ditambahkan ke dalam sumur) membutuhkan ruangan kultivasi steril untuk perbanyakannya.
Peningkatan aktivitas mikroba sejalan dengan pertumbuhan. Hal ini	Mikroba indigen (mikroba yang berasal dari sumur minyak bumi) membutuhkan standar evaluasi untuk memastikan

Keuntungan	Kerugian
berlawanan dengan teknologi EOR lainnya dalam jarak dan waktu	kinerja mikroba selama proses aplikasi MEOR (contoh: metode/periode sampling, kondisi minyak/batuan, dll).
Lebih efisien apabila dibandingkan dengan metode EOR lainnya apabila diterapkan pada reservoir minyak karbonat	Pertumbuhan mikroba akan lebih baik, Ketika: permeabilitas lapisan lebih dari 50 md, suhu reservoir (sumur) lebih rendah dari 80 °C, salinitas di bawah 150 g/L dan kedalaman reservoir kurang dari 2400m.
Meningkatkan produksi minyak	
Aplikasi yang mudah serta pemasangan sistem yang lebih murah	
Hanya memerlukan sedikit modifikasi dari fasilitas yang sudah ada	
Sel mikroba dan metabolit yang dihasilkannya bersifat biodegradable sehingga ramah untuk lingkungan.	

Oleh karena itu, sangat penting mempelajari mekanisme mikroba dalam mendegradasi hidrokarbon serta melakukan pengendalian metabolismenya sehingga mikroba dapat digunakan dalam teknologi MEOR secara lebih aman dan memberikan hasil yang baik.

1.2 Karakterisasi Mikroba untuk Aplikasi MEOR

1.2.1 Komunitas Mikroba Petrofilik

Penemuan awal adanya pertumbuhan mikroba di dalam *oil field production waters* dilaporkan oleh Edson S. Bastian pada tahun 1926. Hal ini menandai awal studi ekologi mikroba di dalam sumur minyak bumi. Dalam penelitian tersebut Bastian dan rekan-rekannya mempertanyakan asal mula keberadaan dari bakteri ini dan menghipotesiskan bahwa bakteri tersebut dapat berasal dari *connate brines*. Terkait dengan hal tersebut, kemungkinan bahwa bakteri dapat tumbuh dengan baik di dalam reservoir minyak bumi disebutkan untuk pertama kalinya. Dan selanjutnya sejumlah penelitian mengenai bakteri yang dapat tumbuh di lingkungan *sub-surface* sampai beberapa km di bawah permukaan bumi banyak dilaporkan (Magot, 2005).

Walaupun keberadaan populasi mikroba indigenous di dalam reservoir minyak bumi sudah diketahui sejak lama, tetapi tidak terlalu banyak pustaka yang membahas secara khusus mengenai mikroba yang kemudian dikenal sebagai mikroba petrofilik (hidrokarbonoklastik) akibat kemampuannya dalam menggunakan substrat hidrokarbon sebagai sumber karbon untuk pertumbuhannya.

Mikroba hidrokarbonoklastik didefinisikan sebagai mikroba yang mampu mendegradasi senyawa hidrokarbon pada minyak bumi. Mikroba yang terdapat dalam reservoir minyak bumi memiliki karakteristik, antara lain:

- a. Termofilik: tumbuh optimum pada suhu tinggi, dan dikelompokkan menjadi dua yaitu: termofilik fakultatif (25-45 °C) dan termofilik obligat (45-75 °C).
- b. Halofilik: kondisi optimum pertumbuhan pada salinitas tinggi.
- c. Barofilik: kondisi optimum pertumbuhan pada tekanan atmosfer tinggi.
- d. Heterotrof: mampu menggunakan hidrokarbon sebagai sumber karbon.
- e. Anaerob: mampu tumbuh pada konsentrasi oksigen rendah (<10%).

Tidak semua mikroba yang berasal dari sumur minyak bumi dapat dimanfaatkan sebagai agen MEOR. Mikroba yang digunakan untuk aplikasi MEOR juga harus memiliki peran yang disesuaikan dengan karakteristik minyak bumi pada reservoir yang akan diaplikasikan. Berdasarkan perannya dalam MEOR, mikroba dapat dikelompokkan menjadi empat seperti pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Klasifikasi mikroba petrofilik berdasarkan bioproduk yang dihasilkan dan peranannya dalam MEOR

Produk Mikroba	Peranan dalam MEOR	Pengaruh yang dihasilkan
Biosurfaktan	Mereduksi tegangan antarmuka antara minyak dan permukaan batuan atau air dan meningkatkan skala perpindahan pori.	<i>Microbial surfactant</i> dan <i>Flooding</i>
Asam (asam dan asam lemak dengan berat molekul rendah)	Meningkatkan efektivitas permeabilitas dengan melarutkan endapan karbonat pada pori batuan, menghasilkan gas CO ₂ dari reaksi kimia antara asam dan karbonat, mereduksi viskositas minyak dan mengubahnya menjadi droplet.	Meningkatkan <i>oil flooding</i>
Biopolimer	Mengubah sifat kebasahan, meningkatkan viskositas air dalam <i>water flooding</i> , mengarahkan fluida reservoir menuju daerah yang tidak tersapu, mengontrol permeabilitas air dan meningkatkan penyapuan dengan <i>plugging</i> pada zona permeabilitas yang tinggi atau zona aliran air.	Modifikasi permeabilitas mikroba (<i>selective plugging</i>)
Biomassa	Menggantikan minyak dengan tumbuh di daerah antara minyak dan permukaan batuan/air, degradasi parsial selektif minyak dan berperan sebagai <i>selective</i> dan <i>non selective plugging</i> dalam pembasahan, perubahan viskositas minyak dan desulfurisasi.	<i>Selective plugging</i>

Hingga saat ini telah banyak mikroba hidrokarbonoklastik yang telah berhasil diisolasi dan dikarakterisasi kemampuannya dalam aplikasi MEOR berdasarkan jenis bioproduk yang dihasilkan (Tabel 1.3).

Tabel 1.3 Jenis mikroba dan bioproduk yang berperan dalam aplikasi MEOR

Jenis Mikroba	Bioproduk	Aplikasi
<i>Bacillus licheniformis</i> <i>Leunostoc mesenteroides</i> <i>Xantomonas campestris</i>	Biomassa	- <i>selective plugging</i> - reduksi viskositas - degradasi minyak - perubahan sifat kebasahan
<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> <i>Arthrobacter paraffineus</i> <i>Bacillus licheniformis</i> <i>Clostridium pasteurianum</i> <i>Corynebacterium fasciens</i>	Biosurfaktan (emulsan, soforolipid, peptidolipid, ramnolipid)	- emulsifikasi - menurunkan tegangan antarmuka - mereduksi viskositas
<i>Bacillus polymixa</i> <i>Brevibacterium viscogenes</i> <i>Leunostoc mesenteroides</i>	Biopolimer (alginat, xantan, dekstran, pullulan)	- memodifikasi sifat <i>reservoir</i> setelah penginjeksian - mengontrol mobilitas
<i>Clostridium acetobutylicum</i> <i>Clostridium pasteurianum</i>	Pelarut (n-butanol, aseton, etanol)	- peningkatan kelarutan minyak - mereduksi viskositas
<i>Clostridium spp.</i> <i>Enterobacter aerogenes</i> <i>Clostridium acetobutylicum</i>	Asam (asetat, butirat)	- meningkatkan permeabilitas - emulsifikasi - meningkatkan tekanan - <i>oil swelling</i> - menurunkan tegangan antarmuka
<i>Clostridium acetobutylicum</i> <i>Enterobacter aerogenes</i> <i>Methanobacterium sp</i>	Gas (CO ₂ , CH ₄ , H ₂)	- mereduksi viskositas - meningkatkan permeabilitas

1.3 Karakterisasi Sumur Minyak untuk Aplikasi MEOR

1.3.1 Karakteristik Sumur Minyak Bumi

Pada umumnya setiap sumur reservoir memiliki karakteristik fisika dan kimia yang khas. Tidak semua sumur minyak bumi dapat dilakukan aplikasi MEOR secara efektif, terdapat kriteria sumur minyak dalam penerapan MEOR yang harus dipenuhi, seperti yang dijelaskan oleh Aldasani dan Bai (2010) dan Bryant (1991) yang dijadikan sebagai acuan (Tabel 1.4).

Tabel 1.4 Karakteristik sumur minyak bumi untuk aplikasi MEOR berdasarkan Aldasani dan Bai (2010) dan Bryant (1991).

Parameter	Referensi	
	Bryant	Aldasani dan Bai
suhu (F)	,170	89-90
Kedalaman (kaki)	,8000	1572-3463
Permeabilitas (md)	,50	60-200
Jenis formasi	-	Batu pasir
Saturasi Minyak (%PV)	,25	55-65
Porositas (%)	-	12-28
Viskositas (cP)	-	1.7-8900
API gravitasi	,15	12-33

Karakteristik sumur minyak bumi yang diterapkan ini bertujuan untuk menilai potensi keberadaan mikroba yang dapat berperan dalam MEOR yang dapat hidup di dalam sumur minyak bumi. Evaluasi ini sangat penting karena pemanfaatan mikroba indigenus (yang berasal dari sumur minyak bumi) memiliki nilai keberhasilan yang lebih tinggi dibandingkan dengan mikroba yang berasal dari sumur lainnya. Hal ini dikarenakan, mikroba indigenus telah teradaptasi terhadap lingkungan sumur, sehingga memiliki toleransi yang tinggi terhadap cekaman yang ada pada sumur tersebut.

Karakteristik porositas batuan reservoir memiliki peran penting dalam penentuan kelayakan sumur untuk aplikasi MEOR. Batuan pada reservoir yang dapat diaplikasikan MEOR harus memiliki porositas yang tinggi. Menurut Tarek (2001), porositas batuan merepresentasikan kapasitas penyimpanan (volume pori) fluida pada suatu reservoir. Porositas merupakan perbandingan antara volume pori dengan volume total.

Terdapat dua macam porositas di alam: *original porosity* dan *induced porosity*. *Original porosity* mengacu pada porositas yang terbentuk saat pembentukan batuan. Sedangkan, *induced porosity* mengacu pada perubahan terhadap *original porosity* saat diagenesis batu tersebut (Amyx, 1960). Pada aplikasi MEOR, ukuran diameter pori minimum mengacu pada dua kali diameter mikroba yang akan diaplikasikan. Dengan asumsi ukuran mikroba adalah diameter 0,25-1 um dan panjang 0,2-5 um, maka ukuran diameter pori berada pada rentang 0,5-2 um dengan panjang 0,5-10 um (Subtelle, 1993).

1.3.2 Karakteristik Minyak Bumi untuk Aplikasi MEOR

Berbagai sifat fisika-kimia minyak bumi dan faktor lingkungan memengaruhi kemampuan degradasi mikroba. Variasi antara faktor-faktor ini mampu

memengaruhi persebarannya di dalam reservoir dan juga saling memengaruhi satu sama lain.

Senyawa hidrokarbon memiliki perbedaan dalam kerentanannya terhadap biodegradasi. Telah dibuat urutan kerentanan tersebut, yaitu: n-alkana > alkana rantai cabang > aromatik ringan > alkana siklik. Namun, pola ini tidak bersifat universal. Biodegradasi senyawa alkil-aromatik pada sampel minyak lebih dahulu teramati dari pada degradasi n-alkana. Heterogenitas komposisi minyak juga dapat berpengaruh pada biodegradasi. Umumnya hidrokarbon dengan rantai yang lebih pendek lebih mudah didegradasi oleh mikroba.

Selanjutnya, kondisi fisik minyak bumi juga memiliki peran dalam penentuan aktivitas mikroba di dalam sumur. Minyak dalam bentuk *droplets* (tetes minyak) lebih mudah didegradasi oleh mikroba. Hal ini karena rasio luas permukaan kontak menjadi lebih besar. Mikroba dapat diamati pertumbuhannya pada keseluruhan permukaan sebuah tetesan minyak. Semakin besar luas permukaan tetesan, semakin banyak koloni mikroba yang tumbuh sehingga laju biodegradasi semakin cepat.

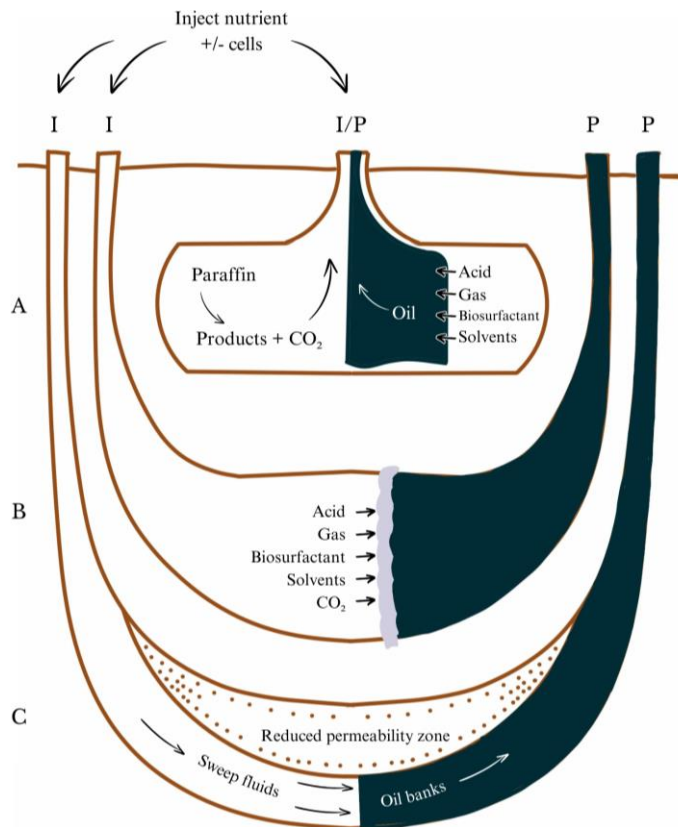
Hidrokarbon yang tersedia sebagai sumber substrat bagi mikroba dapat berupa hidrokarbon cair ataupun *solid*. Pengambilan hidrokarbon cair dapat dilakukan secara langsung dari senyawa yang terlarut, dari interfase cair-cair, ataupun dari hasil mekanisme pseudobilitas. Pengambilan hidrokarbon padat (yang lebih sulit dari bentuk cair), secara umum diinisiasi oleh reaksi enzimatik ekstraseluler dan hanya dapat didegradasi jika diemusifikasikan terlebih dahulu. Sifat fisika-kimia hidrokarbon memengaruhi suseptibilitas mikroba dalam mendegradasinya.

1.4 Mekanisme Kerja MEOR

Mekanisme kerja MEOR dapat dikelompokkan menjadi tiga kelompok (Gambar 1.2), yaitu: (1) degradasi senyawa hidrokarbon (zona A), (2) *microbial enhanced water flooding* (zona B), dan (3) *selective plugging* (zona C) (Youssef et al., 2009). Kemampuan mikroba dalam mendegradasi senyawa hidrokarbon dapat dilakukan secara aerob maupun anaerob. Degradasi hidrokarbon dapat meningkatkan aliran minyak ke sumur produksi dengan mengubah pola drainase atau saturasi fluida pada sumur (Barker et al. 2003). Proses degradasi

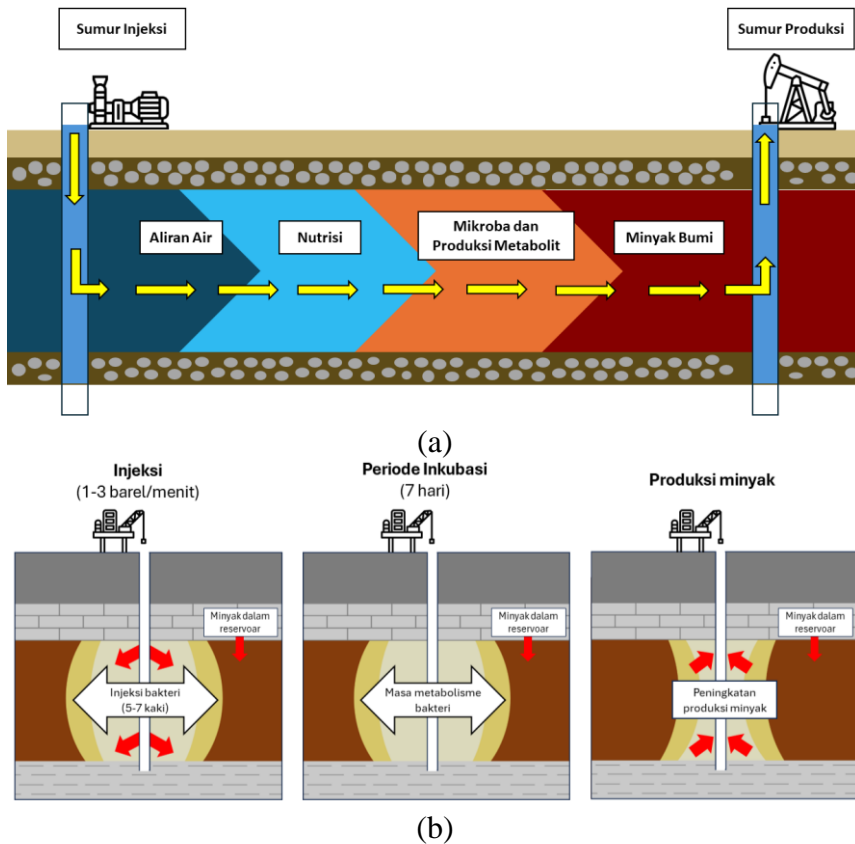
hidrokarbon dapat dilakukan dengan stimulasi nutrisi dan/atau injeksi sel mikroba hidrokarbonoklastik. Hidrokarbon rantai panjang akan diuraikan menjadi rantai yang lebih pendek, sehingga menyebabkan penurunan viskositas minyak. Penurunan viskositas minyak bumi selanjutnya berdampak terhadap peningkatan mobilitas minyak bumi di dalam sumur (Youssef et al. 2009).

Pada *microbial enhanced waterflooding*, peranan mikroba pada aliran EOR sangat penting dalam memobilisasi minyak bumi. Hal ini dikarenakan bioproduk yang dihasilkan oleh mikroba (asam, gas, pelarut, biosurfaktan) mampu mengubah sifat fisika-kimia minyak bumi yang berdampak pada peningkatan kelarutan minyak bumi, seperti yang telah dipaparkan pada Tabel 1.2.



Gambar 1.2 Pola mekanisme kerja MEOR dapat dikelompokkan menjadi 3: degradasi senyawa hidrokarbon (zona A), *microbial enhanced water flooding* (zona B), dan *selective plugging* (zona C) (Youssef et al., 2009).

Proses *selective plugging* memanfaatkan biomassa dan biopolimer yang dihasilkan oleh mikroba. Pemanfaatan biopolimer dikenal sebagai *polymer gelled*, yaitu suatu sistem yang mampu menurunkan aliran fluida pada daerah dengan permeabilitas tinggi. Selain itu biopolimer ini juga mampu mengarahkan fluida pada daerah dengan saturasi tinggi (Abdul dan Farouq Ali, 2003). Aplikasi MEOR diharapkan mampu meningkatkan pertumbuhan mikroba pada daerah yang memiliki permeabilitas tinggi, yang kemudian mampu meningkatkan perolehan minyak bumi.



Gambar 1.3 Skema aplikasi MEOR dengan pendekatan (a) *microbial flooding* dan (b) *Huff and Puff*

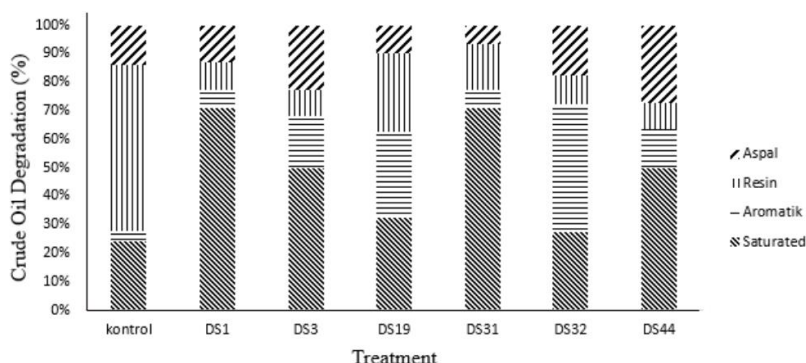
Pola mekanisme kerja MEOR tersebut digunakan sebagai landasan teknis untuk menentukan strategi MEOR baik dengan pendekatan bioaugmentasi maupun biostimulasi. Pada pelaksanaannya MEOR dapat dilakukan baik dengan *microbial flooding* maupun *Huff and Puff*. Pada teknik *microbial flooding* nutrisi dan/atau mikroba diinjeksikan pada sumur injeksi dan perolehan minyak dihasilkan pada sumur produksi (Gambar 1.3.a). Sementara pada

Teknik *huff and puff* nutrisi dan/atau mikroba diinjeksikan pada sumur yang sama dengan sumur produksi (Gambar 1.3 (b)). Oleh karenanya, perancangan lokasi sumur untuk aplikasi dengan pendekatan ini harus mempertimbangkan karakteristik geofisika sumur minyak bumi untuk memastikan arah aliran fluida.

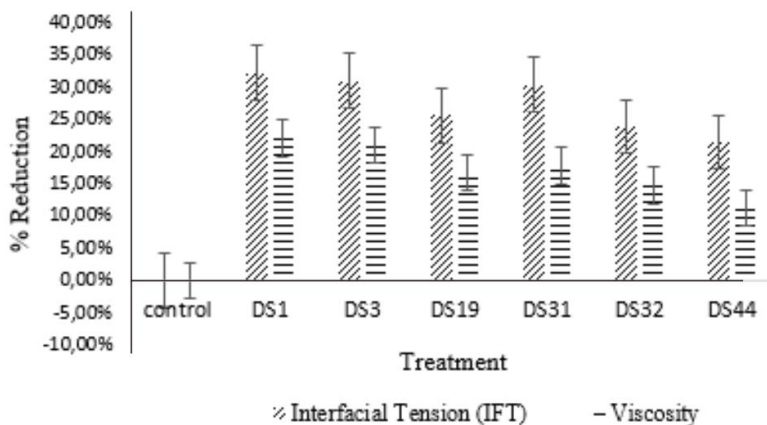
2 KAJIAN APLIKASI MEOR SKALA LABORATORIUM DAN PENGEMBANGANNYA

2.1 Isolasi dan Penapisan Mikroba Hidrokarbonoklastik untuk Aplikasi MEOR

Teknologi MEOR memanfaatkan aktivitas metabolisme mikroba seperti degradasi fraksi hidrokarbon yang mengubah karakteristik minyak dan meningkatkan perolehan minyak dari reservoir. Pada penelitian yang kami lakukan difokuskan pada isolasi bakteri hidrokarbonoklastik yang dapat mendegradasi fraksi SARA (*Saturated, Aromatic, Resinic, Asphaltenes*) minyak bumi. Bakteri hidrokarbonoklastik diisolasi secara bertahap dengan minyak bumi sebagai sumber karbon. Isolat yang diperoleh diseleksi berdasarkan aktivitasnya dalam mendegradasi minyak bumi. Pada studi kasus sumur minyak di Sumatra Selatan diperoleh tiga puluh satu isolat bakteri melalui isolasi bertahap (Astuti et al., 2017). Berdasarkan hasil seleksi dipilih enam isolat dengan kemampuan degradasi minyak bumi yang baik. Hasil analisis fraksi SARA menunjukkan aktivitas degradasi isolat fraksi SARA minyak bumi sekitar 6-70% per fraksi (Gambar 2.1). Degradasi diikuti oleh produksi CO₂ berkisar antara 2000-4000 mg secara signifikan (nilai $p < 0,05$). Aktivitas degradasi mikroba juga ditunjukkan melalui penurunan viskositas dan IFT minyak sekitar 17-31% (Gambar 2.2). Berdasarkan kajian tersebut isolat dengan kemampuan degradasi fraksi hidrokarbon terbaik, teridentifikasi sebagai strain *Bacillus licheniformis* dan berpotensi untuk digunakan dalam teknologi MEOR (Astuti et al., 2017).



Gambar 2.1 Perubahan fraksi SARA setelah 7 hari penambahan isolat bakteri potensial untuk aplikasi MEOR pada media SMSS dengan minyak bumi mentah sebagai sumber karbon (Astuti et al., 2017).



Gambar 2.2 Perubahan tekanan permukaan minyak bumi setelah 7 hari penambahan isolat bakteri potensial untuk aplikasi MEOR pada media SMSS dengan minyak bumi mentah sebagai sumber karbon (Astuti et al., 2017).

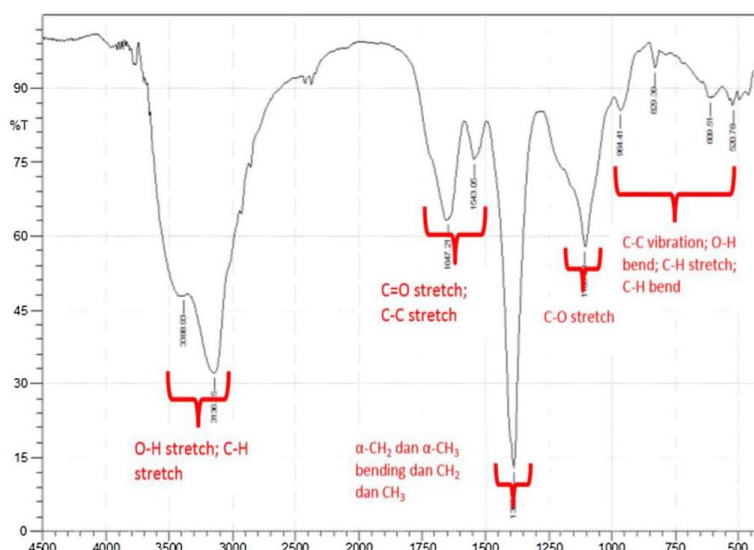
2.2 Optimasi Produksi Bakteri Penghasil Biosurfaktan untuk Aplikasi MEOR

Mikroba penghasil biosurfaktan memiliki peranan penting dalam aplikasi MEOR. Biosurfaktan bertindak sebagai molekul aktif yang dapat mengurangi tegangan antarmuka (IFT) antara komponen fluida yang berbeda, dan meningkatkan pseudosolubilisasi minyak dalam air dengan menciptakan tetesan minyak yang lebih kecil (Khire, 2010). Injeksi biosurfaktan yang dimurnikan sebagian telah meningkatkan perolehan minyak hingga 40% (Mcinerney et al. 2003). Dibandingkan dengan surfaktan yang disintesis secara kimiawi, biosurfaktan dapat terurai secara hayati, tidak beracun, memiliki karakteristik yang beragam, dan stabil dalam kondisi ekstrem. Produksi biosurfaktan dapat secara signifikan lebih terjangkau, karena dapat diproduksi dengan menggunakan limbah biomassa (Gautam dan Tyagi 2008; Jing dkk. 2011; Dhasayan dkk. 2014).

Pada studi kasus pada sumur minyak berbeda di Sumatra Selatan telah dilakukan kajian potensi biosurfaktan untuk implementasi MEOR dan analisis stabilitasnya dalam berbagai kondisi lingkungan. Berdasarkan hasil skrining isolat dengan kode G3 menunjukkan aktivitas emulsifikasi tertinggi ($E_i = 72,90\%$) (Astuti et al., 2019). Hasil ini mengindikasikan bahwa isolat G3 merupakan bakteri penghasil biosurfaktan. Bakteri ini dapat tumbuh pada suhu yang cukup tinggi hingga $55\text{ }^\circ\text{C}$. Bakteri G3 dapat menurunkan IFT antara minyak dan air dari 12,9 menjadi 9,7 dyne/cm. CMC (*critical micelle*

concentration) efektif dari biosurfaktan yang diproduksi oleh G3 adalah 0,73 g/L. Berdasarkan hasil tersebut, biosurfaktan G3 diamati memiliki kemampuan menurunkan tegangan permukaan yang baik dan aktivitas emulsifikasi yang tinggi. Oleh karena itu, molekul ini memiliki potensi untuk diaplikasikan dalam MEOR. Selanjutnya, berdasarkan identifikasi molekuler G3 teridentifikasi sebagai *Pseudoxanthomonas* (Astuti et al., 2019).

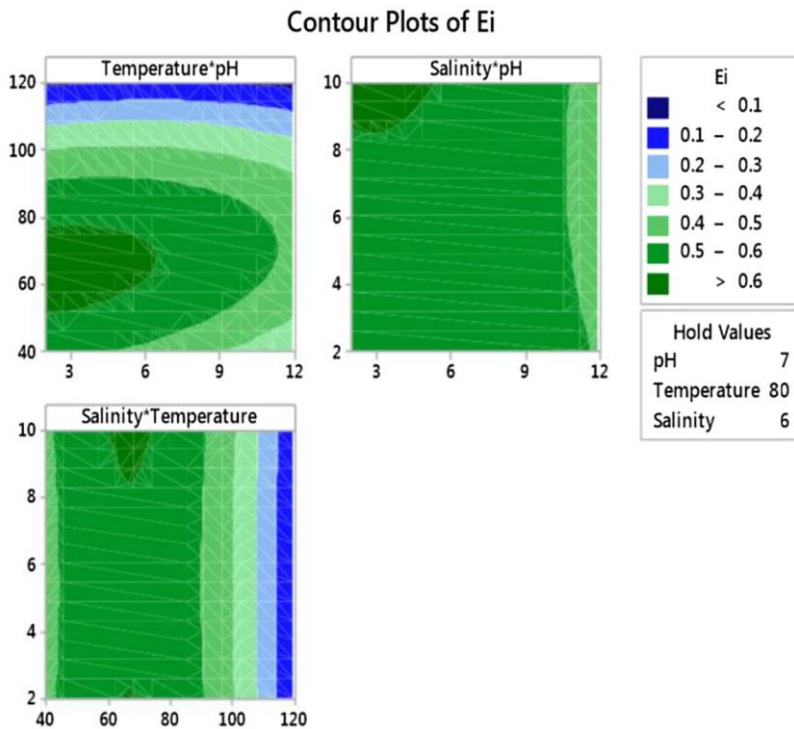
Analisis awal untuk mengkarakterisasi biosurfaktan yang dihasilkan oleh *Pseudoxanthomonas* sp. G3 dilakukan dengan menggunakan spektroskopi FT-IR. Berdasarkan hasil analisis FT-IR menunjukkan bahwa biosurfaktan yang dihasilkan oleh G3 termasuk ke dalam kelompok glikolipid (Astuti et al., 2019).



Gambar 2.3 Spektrum analisis FTIR dari biosurfaktan yang diproduksi oleh *Pseudoxanthomonas* sp. G3 (Astuti et al., 2019).

Efektivitas biosurfaktan yang diproduksi oleh *Pseudoxanthomonas* sp. G3 untuk implementasi MEOR dievaluasi dengan mempelajari stabilitas emulsifikasinya yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan: pH, suhu, dan salinitas. Faktor lingkungan yang paling penting dalam mekanisme MEOR, khususnya untuk injeksi biosurfaktan, seperti yang dilaporkan oleh Al-Sulaimani, dkk. (2011) antara lain: harus stabil pada suhu 50-80 °C, rentang pH yang lebar, dan berbagai konsentrasi salinitas yang menyimulasikan kondisi reservoir minyak bumi (Astuti et al., 2019).

Untuk menentukan hubungan yang disebabkan oleh efek interaktif dari faktor kritis sebelumnya dengan stabilitas biosurfaktan, persamaan regresi polinomial dibuat dengan menggunakan model Box-Behnken dari metodologi respons-permukaan. Berdasarkan hasil analisis didapatkan bahwa indeks emulsifikasi dari biosurfaktan yang dihasilkan oleh G3 stabil pada rentang kondisi: pH 2-12, salinitas hingga 10%, dan suhu hingga 100 °C (Gambar 2.4) (Astuti et al., 2019).

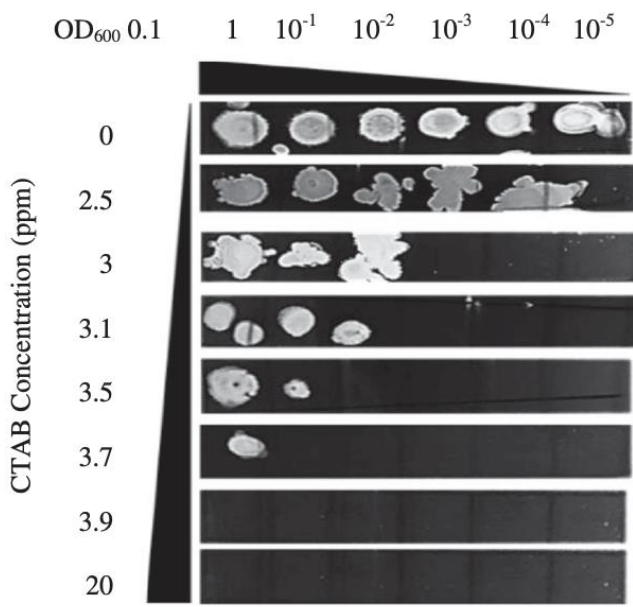


Gambar 2.4 Hasil uji stabilitas biosurfaktan oleh *Pseudoxanthomonas* sp. G3 dengan pendekatan Response surface methodology (Box bhenken design) menggunakan 3 faktor (suhu, pH, dan salinitas) (Astuti et al., 2019).

2.3 Peningkatan Kemampuan Bakteri Penghasil Biosurfaktan dengan Pendekatan *Adaptive Laboratory Evolution* (ALE)

Implementasi ALE pada dasarnya adalah proses evolusi yang dipercepat. Mekanisme adaptasi dan seleksi alam mendorong munculnya sifat fenotipik spesifik selama proses evolusi. Karakteristik ini dapat menguntungkan dalam beberapa situasi, tetapi juga dapat menjadi beban dalam situasi lain (Urry et al. 2016). Konsekuensi dari proses pertukaran evolusi ini tidak dapat dihindari

karena adanya keterbatasan dari kemampuan sel (*fundamental constraints*). Paparan CTAB menyebabkan respons stres pada sel. Respons sel pada tingkat molekuler dikendalikan oleh *rpoS* sebagai faktor transkripsi (Ismail et al. 2014). Ekspresi *rpoS* dapat mengatur metabolisme sel selama respons stres, terutama metabolisme polisakarida, lipid, dan peptida yang berhubungan langsung dengan jalur biosintesis biosurfaktan (Ismail et al. 2014; Liu X et al. 2019). Oleh karena itu, stres CTAB akan meningkatkan ekspresi *rpoS* dan meningkatkan produksi biosurfaktan yang lebih tinggi. Biosurfaktan ini kemudian akan bertindak sebagai mekanisme pertahanan sel, membatasi interaksi antara CTAB dan sel bakteri (Bragg et al. 2014; Knauf et al. 2018; Walton et al. 2008). Rentang konsentrasi paparan CTAB 3 ppm (sebagai konsentrasi sub-lethal) hingga 10 ppm (sebagai konsentrasi bakterisida) dipilih untuk perlakuan ALE dalam pengembangan galur mutan ini (Gerba 2015; Tezel dan Pavlostathis 2015). Pada studi kasus ini digunakan isolate ABG2 yang telah diisolasi dari sumur minyak di Jatibarang, Jawa Barat (Astuti et al., 2020).



Gambar 2.5 Spot dilution assay untuk menentukan pengaruh konsentrasi CTAB terhadap isolate bakteri hidrokarbonoklastik ABG2 pada agar LB, 50 °C selama 24 jam (Astuti et al. 2022).

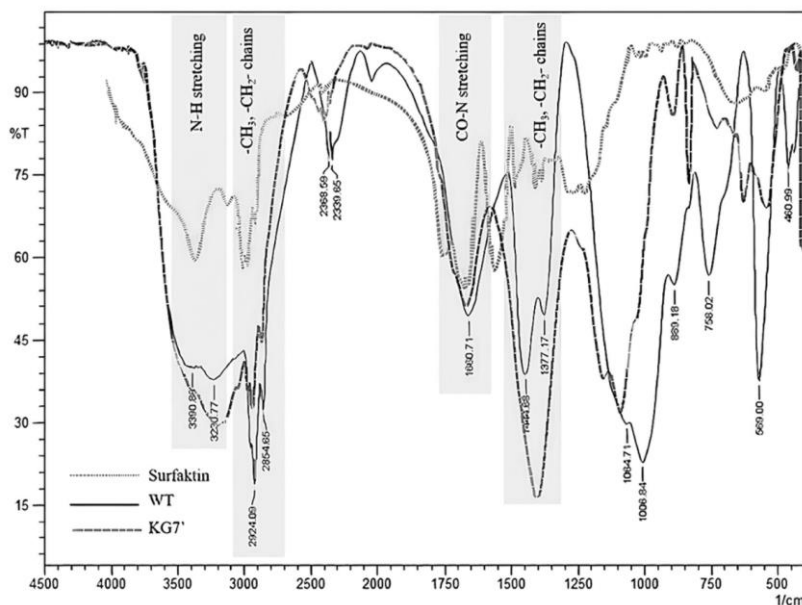
Hasil penapisan mutan yang resisten terhadap CTAB dapat dilihat pada Gambar 2.5. Pada konsentrasi 3,9 ppm tidak terlihat adanya pertumbuhan bakteri yang menunjukan bahwa konsentrasi ini merupakan MIC untuk bakteri ABG2. Selanjutnya didapatkan tiga galur resisten CTAB yang. Galur KG7'

mengalami peningkatan yang signifikan pada semua parameter dibandingkan dengan WT (*wild type/ galur liar*) ($p < 0,1$). Hasil evaluasi penurunan IFT oleh KG7' adalah 3,3 kali lipat lebih tinggi dari WT ($p < 0,01$) (Astuti et al. 2022).

Galur mutan KGT' selanjutnya ditumbuhkan dalam cekaman CTAB yang lebih tinggi untuk meningkatkan stabilitas mutasi yang dimilikinya, yaitu pada konsentrasi 3,9 ppm (KG7'a) dan 4,5 ppm (KGT'b). Kedua mutan tersebut tetap stabil, dengan nilai frekuensi mutan lebih dari 90% hingga generasi ke-30. Berdasarkan data pada Tabel 2.1, laju produksi biosurfaktan dari mutan-mutan tersebut tidak berbeda secara signifikan. Berdasarkan konsentrasi biosurfaktan, KG7'a dan KG7'b memiliki produktivitas yang sama dengan *Wild Type* (WT) (Astuti et al., 2022).

Tabel 2.1 Hasil profil produksi dan kemampuan emulsifikasi dari bakteri penghasil biosurfaktan WT, mutan KG7'a dan KG7'b dalam media SMSS + 5% (v/v) minyak bumi (Astuti et al., 2022)

Parameter	WT	KG7'a	KG7'b
Biosurfaktan (g/L)	0,12	0,11	0,10
Emulsi minyak bumi berat (%)	71,3	74,5	80
Emulsi minyak bumi berat (%)	58,9	47,6	51,8



Gambar 2.6. Spektrum analisis FTIR dari biosurfaktan yang diproduksi oleh galur WT, mutan KG7' dan surfaktin (Astuti et al. 2022).

Berdasarkan karakterisasi struktur biosurfaktan, biosurfaktan WT dan KG7' termasuk dalam lipopeptida dengan aktivitas yang berbeda (Gambar 2.6).

Panjang rantai alifatik menentukan aktivitas biosurfaktan. Termosensitivitas biosurfaktan akan dipengaruhi oleh rantai alifatik, dan komposisi asam amino peptida akan memengaruhi osmosensitivitas dan toleransi pH (Liu JF et al. 2015). Dari hasil penelitian tersebut, biosurfaktan mutan memiliki aktivitas emulsifikasi yang lebih tinggi pada minyak bumi berat. Namun, peningkatan tidak terjadi pada emulsifikasi minyak bumi ringan (Tabel. 3). Hal ini dapat terjadi karena ALE tidak hanya mengubah kemampuan memproduksi biosurfaktan, tetapi juga struktur biosurfaktan yang dihasilkan. Perubahan struktur ini memengaruhi kemampuan biosurfaktan KG7'b untuk mengemulsi minyak mentah berat yang digunakan dalam penelitian ini. Selain itu, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa biosurfaktan yang dihasilkan oleh KG7'b berpotensi untuk meningkatkan perolehan minyak dari reservoir yang memiliki karakteristik minyak mentah berat (Astuti et al., 2022).

2.4 Simulasi Aplikasi MEOR dengan Skala Laboratorium

2.4.1 Simulasi dengan Pendekatan *Sand-packed Column*

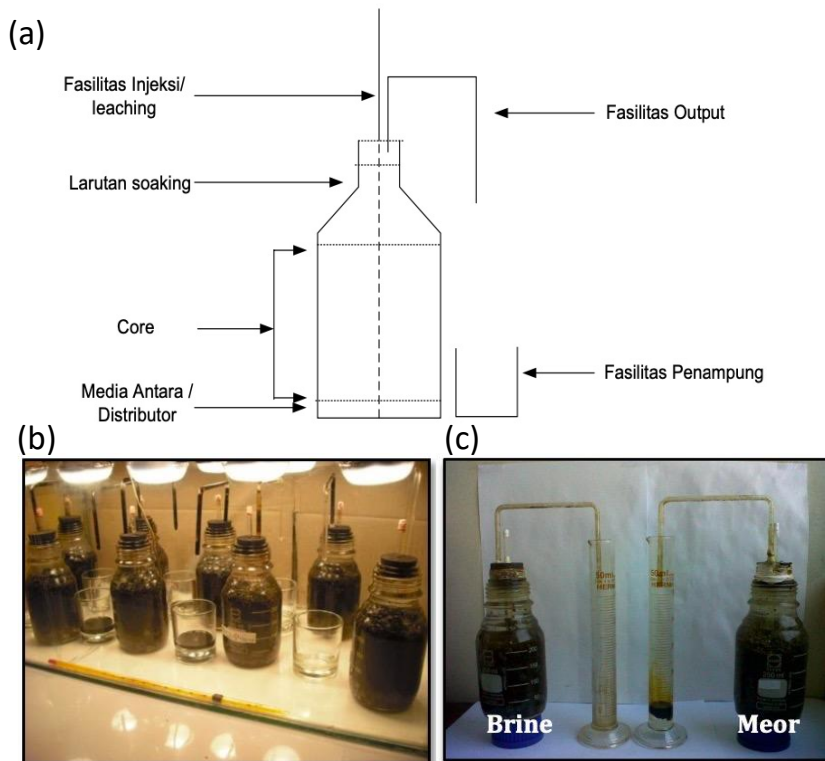
Evaluasi penerapan biosurfaktan yang diproduksi oleh *Pseudoxanthomonas sp. G3* untuk MEOR dilakukan simulasi skala laboratorium dengan menggunakan *sand-packed column*. Pada proses ini ekstrak biosurfaktan dialirkan ke dalam kolom yang telah diisi pasir dan minyak bumi untuk melihat kemampuannya dalam meningkatkan perolehan minyak bumi. Hasil pengujian didapatkan bahwa biosurfaktan G3 mampu meningkatkan perolehan minyak bumi hingga 38,46-42,11 %. Dibandingkan dengan kontrol (air formasi) biosurfaktan G3 mampu meningkatkan hingga 20% (Tabel 2.2).

Tabel 2.2 Hasil perolehan minyak bumi dari simulasi MEOR skala laboratorium dengan menggunakan *sand-packed column* menggunakan *brine flooding* dan ekstrak biosurfaktan dari *Pseudoxanthomonas sp. G3* (Astuti et al., 2019).

Parameter	kontrol	R1	R2
PV (mL)	53,5	53	55
Porosity (%)	21,4	21,2	22
OOIP (mL)	43,5	43	47
Soi (%)	81,31	79,24	85
Swi (%)	18,69	20,75	14,54
Sorwf (mL)	31	30	28
Sor (%)	28,73	30,23	40,42
Sorbf (mL)	2,3	5	8
AOR (%)	18,4	38,46	42,11

2.4.2 Simulasi Laboratorium dengan Uji Imbibisi

Pada simulasi MEOR skala laboratorium dengan uji imbibisi digunakan *artificial core* (batuan sintesis dengan karakter porositas dan permeabilitas yang menyerupai kondisi sumur target). Selain *artificial core*, pada simulasi ini juga dilakukan perancangan sistem untuk dapat mensimulasikan perolehan minyak bumi yang terperangkap pada *artificial core* setelah perlakuan MEOR. Rancangan skema alat, pengujian laboratorium, dan hasilnya dapat dilihat pada Gambar 2.7 (Ariadji et al., 2017).



Gambar 2.7 Rancangan simulasi aplikasi MEOR dengan uji imbibisi. (a) skema alat, (b) pengujian dalam laboratorium, (c) hasil perolehan minyak bumi dengan MEOR (kanan) dibandingkan dengan kontrol (kiri) dengan menggunakan sampel minyak bumi dari sumur Mangunjaya (MJ-122) (Ariadji et al., 2017).

Berdasarkan Gambar 2.7 (c) dapat terlihat bahwa hasil uji imbibisi setelah penambahan mikroba (MEOR-bioaugmentasi) menghasilkan perolehan minyak yang lebih banyak dibandingkan dengan kontrol, yaitu larutan tanpa mikroba (air formasi). Simulasi skala laboratorium ini dilakukan untuk mendapatkan data awal efisiensi MEOR ketika akan di aplikasikan pada skala

lapangan. Pada studi kasus ini, telah dilakukan uji imbibisi dengan menggunakan sampel minyak bumi dan kondisi sumur dari lokasi yang berbeda (Tabel 2.3). Berdasarkan hasil pengujian didapatkan peningkatan perolehan minyak bumi setelah aplikasi MEOR selama 14 hari berada pada rentang (3-12 %) (Ariadji et al., 2017).

Tabel 2.3 Hasil perolehan minyak bumi dari simulasi MEOR (bioaugmentasi) skala laboratorium dengan uji imbibisi pada berbagai sampel minyak dari Mangunjaya (Ariadji et al., 2017).

Minyak	Presentase oil recovery (%)	
	MEOR	Larutan brine (blanko)
MJ-122 (50°C)	12%	0%
MJ-74 (52°C)	3%	0%
MJ-125 (50°C)	12% (SP); 9.8% (PW)	0%
MJ-116 (50°C)	5.7% (SP); 7.9% (PW)	0%
MJ-42 (50°C)	5.40%	0%

3 KAJIAN APLIKASI MEOR SKALA LAPANGAN DAN TANTANGANNYA

3.1 Persiapan Analisis Kesiapan Sumur Minyak Bumi untuk Aplikasi MEOR

Mengidentifikasi kandidat lapangan yang tepat untuk aplikasi metode MEOR yang dipilih merupakan langkah awal skrining. Pemilihan sumur untuk MEOR didasarkan pada dua pendekatan, yaitu skrining umum dan skrining khusus (Alvarado & Manrique, 2010). Pada skrining umum dievaluasi beberapa parameter seperti: permeabilitas, viskositas minyak, suhu reservoir, efisiensi penyapuan air, sisa minyak yang ada (*Remaining oil in place*, ROIP), dan kelengkapan data lainnya. ROIP merupakan salah satu data yang penting untuk memperkirakan potensi perolehan minyak yang dapat dihasilkan, kebutuhan bahan kimia dan kuantitas mikroba yang akan diinjeksikan, dan profitabilitas proyek secara keseluruhan (Lake et al., 1978).

Tabel 3.1 Hasil skrining lapangan Mangunjaya dan Bentayan berdasarkan Aladasani dan Bai (2010), dan Bryant, 1990 (Ariadji, et al. 2020)

Bidang (formasi)	Gravitas (API)	Viskositas (cP)	Minyak Kejenuhan (% PV)	Permeabilitas (mD)	Kedalaman (ft.)	Suhu (°F)	Jenis Formasi	Referensi
Mangunjaya (Palembang A)	OK	-	OK	OK	OK	OK	-	Bryant (1990)
	OK	OK	OK	OK	OK	NO	OK	Aldasani dan Bai (2010)
Mangunjaya (Palembang B)	OK	-	OK	OK	OK	OK	-	Bryant (1990)
	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Aldasani dan Bai (2010)
Mangunjaya (Palembang C)	OK	-	OK	OK	OK	OK	-	Bryant (1990)
	OK	OK	OK	OK	OK	NO	OK	Aldasani dan Bai (2010)
Bentayan	OK	-	OK	OK	OK	NO	-	Bryant (1990)
	OK	OK	OK	OK	OK	NO	OK	Aldasani dan Bai (2010)

Setelah skrining umum, dilanjutkan dengan skrining khusus untuk melihat potensi ekstraksi minyak dari cadangan yang masih ada melalui teknologi MEOR. Parameter yang digunakan untuk melakukan skrining di antaranya: porositas batuan, *oil gravity*, kedalaman sumur, saturasi minyak, tipe formasi, dan suhu sumur (Kögler et al., 2017). Parameter-parameter ini diseleksi berdasarkan pada rujukan umum yang dikembangkan oleh

Aladasani and Bai (2010) dan Bryant (1990) seperti yang tercantum pada Tabel 1.4. Untuk aplikasi MEOR, sifat lapisan *reservoir* dan kondisi operasi sumur menjadi faktor penting dalam pemilihan sumur. Setelah sumur berhasil dipilih, proses dilanjutkan dengan mengidentifikasi kondisi sumur untuk merencanakan desain, instalasi, dan mobilisasi untuk aplikasi MEOR (Aditama et al., 2017, dalam Astuti et al., 2023). Pada Tabel 3.1 merupakan hasil penapisan beberapa sumur yang telah kami lakukan. Sumur-sumur tersebut terletak di Mangunjaya dan Bentayan.

3.2 Aplikasi MEOR dengan Pendekatan Bioaugmentasi

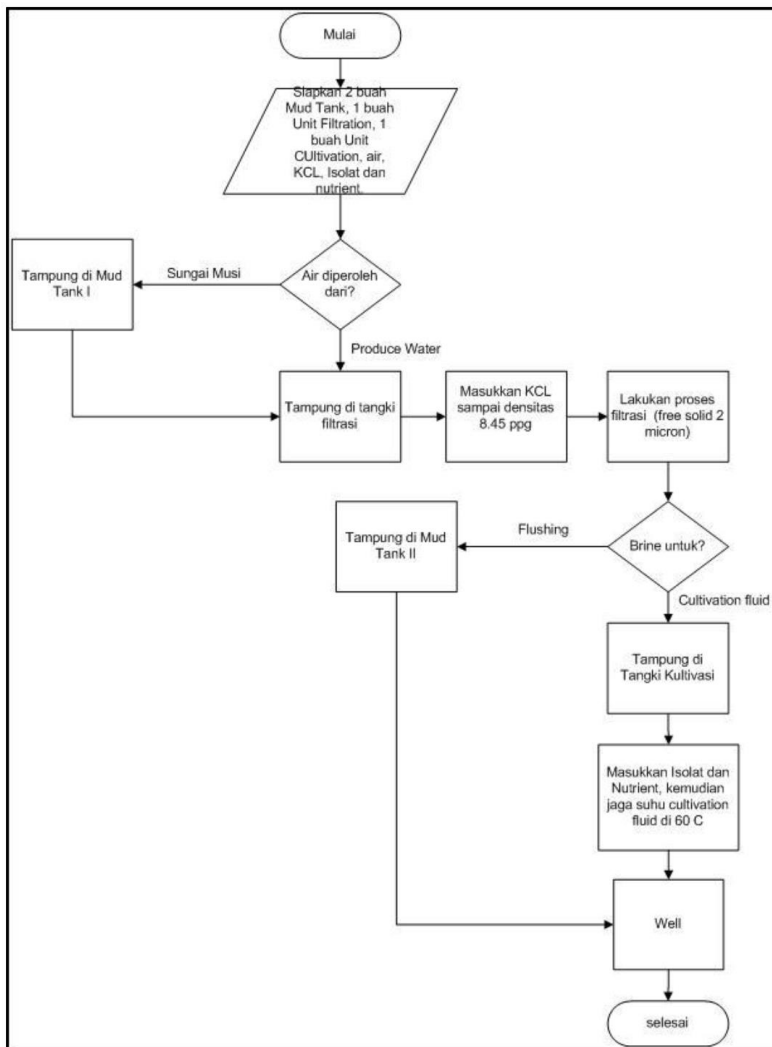
Injeksi mikroba dalam MEOR dapat diaplikasikan dengan menggunakan metode *Huff and Puff* atau *microbial flooding*. Dalam metode biostimulasi *Huff and Puff*, mikroba yang telah diformulasikan diinjeksikan ke dalam *reservoir* melalui sumur produksi. Setelah proses injeksi selesai, sumur ditutup untuk jangka waktu tertentu sebelum mengambil minyak. Kisaran periode ini biasanya 24 jam hingga 7 hari, dan periode perawatan ini diulang setiap 36 bulan sekali (Alkan et al., 2016; Sun et al., 2018; Yu et al., 2014). Pada uji skala lapangan aplikasi MEOR dengan pendekatan bioaugmentasi ini kami bekerja sama dengan pihak ketiga yaitu AIMTOP sebagai pelaksana teknis.

3.2.1 Persiapan

Tahap persiapan dimulai dengan mempersiapkan formulasi mikroba hidrokarbonoklastik yang akan diinjeksikan ke dalam sumur. Mikroba tersebut sebelumnya telah sesuai berdasarkan hasil uji simulasi skala laboratorium yang telah dilakukan sebelumnya (bagian 2.3.2). Tahapan persiapan hingga *monitoring* untuk aplikasi MEOR dengan pendekatan bioaugmentasi dapat dilihat pada gambar 3.2 (Ariadji et al., 2017). Pada aplikasi MEOR dengan pendekatan bioaugmentasi ini dibutuhkan beberapa peralatan dan unit pendukung, antara lain: unit filtrasi air, tangki penampung, tangki kultivasi (fermentor), pompa injeksi, generator set, gudang, dan instalasi laboratorium sementara. Adapun penempatan unit injeksi MEOR dengan bioaugmentasi yang dilakukan di Mangunjaya dapat dilihat pada Gambar 3.1 (Ariadji et al., 2017).



Gambar 3.1 Foto penempatan unit injeksi MEOR dengan bioaugmentasi pada sumur MJ-122 (bekerja sama dengan AIMTOP (Ariadji et al., 2017).

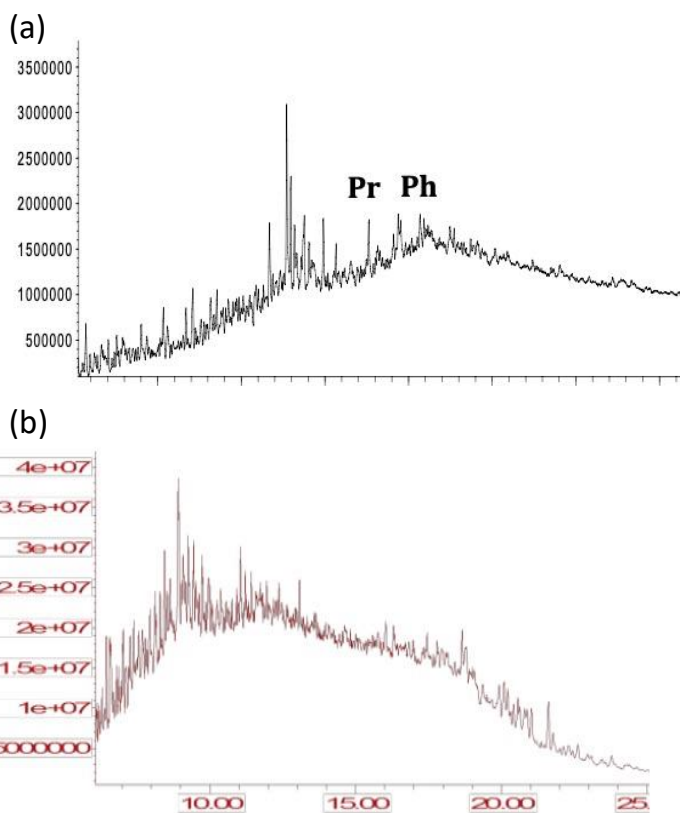


Gambar 3.2 Diagram alir proses aplikasi MEOR dengan bioaugmentasi di Mangunjaya, Sumatra Selatan (Ariadji et al., 2017).

3.2.2 Monitoring

a. Fraksi minyak bumi

Aktivitas mikroorganismenya pada fraksi hidrokarbon minyak bumi dapat menyebabkan terjadinya berbagai macam perubahan karakter fisik minyak bumi, seperti penurunan viskositas dan IFT. Untuk mengonfirmasi terjadinya aktivitas degradasi minyak bumi yang disebabkan oleh mikroba setelah aplikasi MEOR, dilakukan analisis GC/MS pada sampel minyak bumi sebelum dan setelah proses injeksi MEOR agar dapat dilihat perubahan komposisi serta konsentrasi senyawa hidrokarbon dari sampel tersebut. Berdasarkan hasil analisis GC/MS (Gambar 3.3) terhadap sampel sebelum proses dan setelah proses injeksi (1 hingga 4 bulan setelah injeksi) terlihat bahwa terdapat perubahan terhadap tinggi *baseline* kromatogram. Dibandingkan dengan sampel sebelum produksi (September 2015) (Ariadji et al., 2017).



Gambar 3.2 Profil kromatogram GC/MS fraksi hidrokarbon minyak bumi (a) sebelum dan (b) setelah aplikasi MEOR setelah 6 bulan pada sumur minyak MJ-122 (Ariadji et al., 2017).

Berdasarkan hasil analisis semi kuantitatif menggunakan *internal standard marker* Pr/Ph, didapatkan nilai biodegradasi (%) seperti pada Tabel 3.2. Berdasarkan nilai rata-rata degradasi, degradasi fraksi minyak bumi pada sampel minyak bumi sebelum injeksi dan setelah injeksi (1-3 bulan produksi) mengalami peningkatan biodegradasi yang signifikan. Pada produksi bulan pertama dan kedua, teramati bahwa degradasi fraksi hidrokarbon rantai panjang C21 dan C22 mengalami degradasi yang signifikan, dan ketika memasuki fase produksi bulan ketiga, biodegradasi mulai terjadi pada fraksi hidrokarbon rantai pendek dengan persen biodegradasi yang cukup besar. Hal ini mengindikasikan bahwa proses biodegradasi berjalan sudah cukup baik sebab proses biodegradasi terjadi secara menyeluruh dan bertahap.

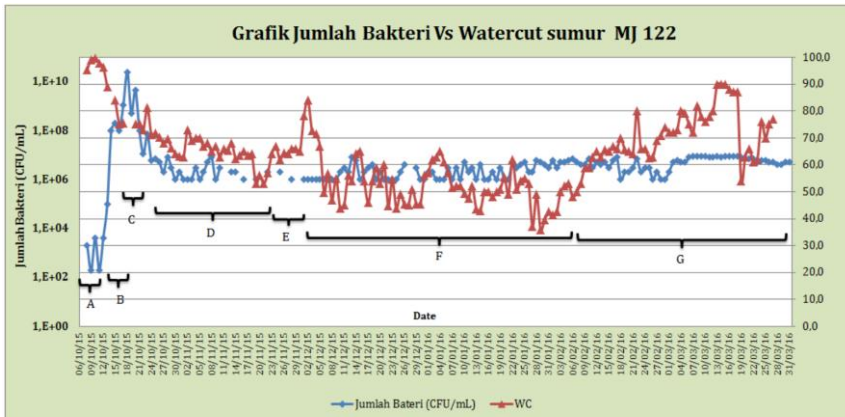
Tabel 3.2 Hasil analisis degradasi fraksi hidrokarbon selama proses aplikasi MEOR dengan bioagmentasi pada sumur minyak MJ-122 (Ariadji et al., 2017).

Rantai karbon	% Biodegradasi			
	sept-okt	okt-nov	nov-des	des-jan
10	6,33%	25,85%	39,86%	2,06%
11	38,68%	14,14%	34,30%	0,40%
12	2,36%	0,70%	26,68%	0,78%
13	1,04%	25,50%	27,84%	0,24%
14	3,18%	22,32%	35,06%	3,53%
15	1,74%	0,70%	40,55%	2,69%
16	2,45%	48,48%	45,73%	13,74%
17	3,23%	16,64%	35,36%	1,43%
18	9,63%	6,36%	23,10%	4,38%
Pristane				
Phytan				
21	33,92%	58,07%	2,45%	54,70%
22	38,01%	32,71%	32,86%	12,99%
Rata-rata %degradasi/fraksi Karbon	12,78%	24,74%	34,28%	3,76%

b. Pertumbuhan mikroba

Hasil *monitoring* mikroba pada sumur minyak MJ-122 selama produksi dapat dilihat Gambar 3.3. Secara keseluruhan pertumbuhan bakteri mengalami peningkatan dari 2×10^3 CFU/mL menjadi 5×10^6 selama 176 hari. Berdasarkan hasil *monitoring* pertumbuhan bakteri, terdapat waktu adaptasi bakteri

hidrokarbonoklastik yang diinjeksikan ke dalam sumur selama empat hari. Bakteri yang berasal dari luar sumur atau eksogen awalnya menggunakan sumber karbon, nitrogen, dan nutrisi lainnya dari media tumbuh sehingga ketika dikenalkan dengan lingkungan baru, kandungan C dan N yang tersedia berbeda dari media tumbuh sebelumnya dan bakteri memerlukan waktu untuk mengenal dan beradaptasi dengan lingkungannya (Ariadji et al., 2017).



Gambar 47. Grafik Populasi mikroba dan watercut selama produksi pada MJ-122

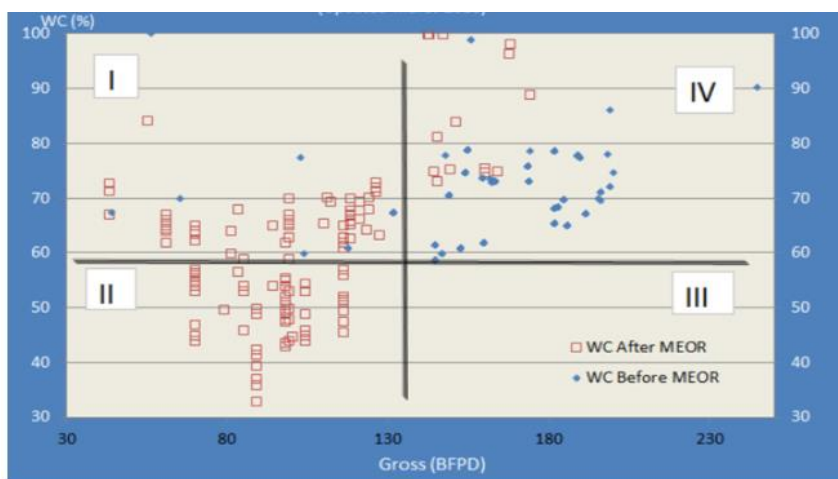
Gambar 3.3 Hasil pemantauan konsentrasi bakteri dan *watercut* pada sumur MJ-122 selama aplikasi MEOR dengan bioaugmentasi (Ariadji et al., 2017).

Pada Gambar 3.3 menunjukkan nilai *watercut* Periode (A) cenderung tetap sekitar 95%. Bakteri yang baru memulai fase adaptasi ini belum menghasilkan produk degradasi sehingga nilai *watercut* masih tinggi. Pertumbuhan bakteri kemudian memasuki fase eksponensial atau peningkatan jumlah bakteri secara drastis dari 4×10^3 CFU/mL menjadi 3×10^{10} CFU/mL selama 11 hari (Ariadji et al., 2017). Biomassa ini berperan dalam mendukung terjadinya reaksi dengan batuan berkapur dan produksi CO₂, emulsifikasi melalui pelekatan dengan hidrokarbon, modifikasi permukaan padat, degradasi dan alterasi minyak, reduksi viskositas dan *pour point* minyak, serta desulfurisasi minyak sehingga mampu meningkatkan produksi minyak (Youssef et al., 2009). Selanjutnya, pada periode B *watercut* menurun dari 96.4% menjadi 75%. Pada periode C terjadi akumulasi biosurfaktan sehingga nilai *watercut* tetap menurun, yakni 75%-71.1%. Setelah hari ke-17 pertumbuhan bakteri cenderung berada dalam fase stasioner pada orde 6 hingga akhir masa monitoring, yakni hari ke-176 (Ariadji et al., 2017). Meski sebelumnya jumlah bakteri mengalami penurunan namun bakteri yang tumbuh mampu melakukan metabolisme hidrokarbon sehingga terjadi penghilangan parafin

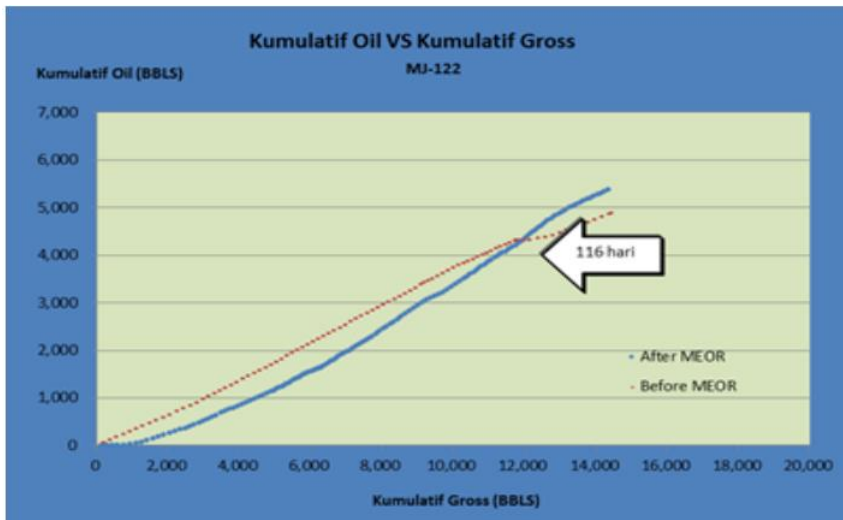
rantai panjang dan peningkatan mobilitas minyak. Metabolisme bakteri juga menghasilkan asam dan gas yang akan meningkatkan porositas dan permeabilitas batuan. Gas juga dapat meningkatkan tekanan reservoir dan mengurangi viskositas sehingga meningkatkan produksi minyak (Youssef et al., 2009). Hal ini dapat diamati dari nilai *watercut* yang menurun dari 71.1% menjadi 64% (Periode D). Nilai *watercut* kembali naik hingga 2 Desember 2015 (Periode E) menjadi 84% yang dapat disebabkan laju pompa yang meningkat sehingga bakteri belum membentuk metabolit yang dapat meningkatkan produksi minyak. *Watercut* kemudian cenderung stabil sekitar 50% hingga akhir Periode F, dan naik kembali hingga akhir Periode G dengan nilai tertinggi 90% yang dipengaruhi laju produksi minyak bumi yang ditingkatkan dari 89 BFPD menjadi 104 BFPD.

3.2.3 Analisis Kinerja MEOR dengan Bioaugmentasi

Analisis kinerja MEOR dengan bioaugmentasi pada sumur MJ-122 dievaluasi melalui perbandingan profil *watercut* terhadap kapasitas produksi kotor sebelum dan sesudah injeksi MEOR selama 3 bulan (Gambar 3.4). Pada diagram tersebut dapat dilihat perubahan yang terjadi setelah implementasi dilakukan. Berdasarkan hasil analisis kinerja MEOR pada sumur MJ-122, profil *watercut* terhadap *gross production* bergeser dari kuadran IV menjadi kuadran I dan II. Ini menunjukkan hasil penurunan *watercut* pada laju produksi yang rendah (Ariadji et al., 2017).



Gambar 3.4 Hasil pemantauan kinerja MEOR dengan bioaugmentasi berdasarkan *watercut* terhadap kapasitas produksi kotor sebelum (biru) dan setelah 3 bulan implementasi (merah) di lapangan Mangunjaya (MJ-122) (Ariadji et al., 2017).



Gambar 3.5 Hasil pemantauan kinerja MEOR dengan bioaugmentasi berdasarkan kumulatif minyak terhadap kapasitas produksi kotor sebelum (merah) dan setelah 3 bulan implementasi (biru) di lapangan Mangunjaya (MJ-122) (Ariadji et al., 2017).

Pada analisis perbandingan profil kumulatif minyak terhadap kapasitas produksi kotor pada sumur MJ-122 sebelum (dan setelah injeksi MEOR ditunjukkan oleh Gambar 3.5 (Ariadji et al., 2017). Hasil analisis menunjukkan peningkatan laju produksi setelah implementasi dilakukan. Dapat diamati bahwa tren produksi kumulatif minyak terhadap kapasitas produksi kotor terjadi perpotongan pada hari ke-116 (Ariadji et al., 2017). Hal ini menunjukkan bahwa pada hari tersebut produksi minyak sudah mengalami peningkatan dibandingkan dengan total fluida yang diproduksi. Berdasarkan keseluruhan data yang ada juga diamati peningkatan produksi yang terjadi pada sumur sekitar MJ-122. Oleh sebab itu implementasi MEOR tidak hanya meningkatkan produksi sumur injeksi, namun juga mampu meningkatkan keseluruhan performa lapangan (Ariadji et al., 2017).

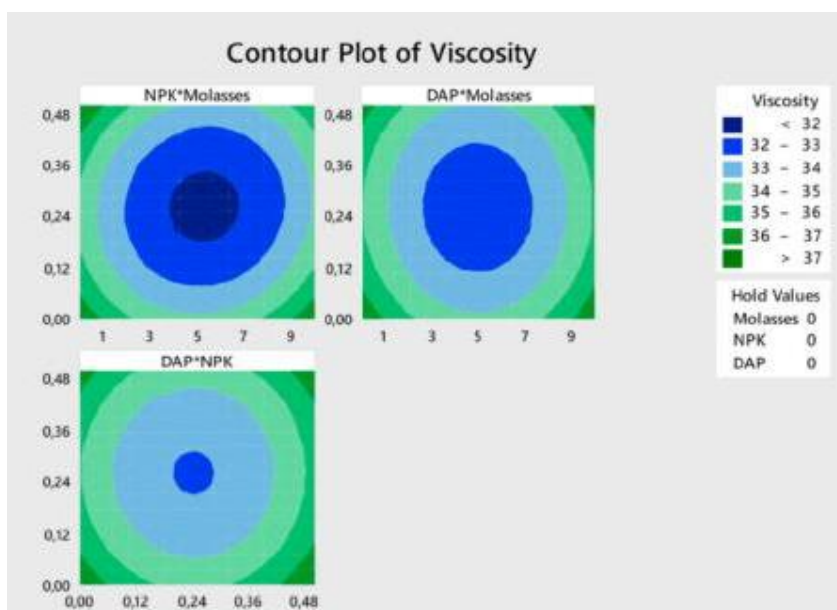
3.3 Aplikasi MEOR dengan Pendekatan Biostimulasi

Injeksi nutrisi dalam MEOR dapat diaplikasikan dengan menggunakan metode *Huff and Puff* atau *microbial flooding*. Dalam metode biostimulasi *Huff and Puff*, nutrisi yang telah diformulasikan diinjeksikan ke dalam reservoir melalui sumur produksi. Setelah proses injeksi selesai, sumur ditutup untuk jangka waktu tertentu sebelum mengambil minyak. Kisaran periode ini biasanya 24 jam hingga 7 hari, dan periode perawatan ini diulang setiap 36 bulan sekali (Alkan et al., 2016; Sun et al., 2018; Yu et al., 2014). Pada aplikasi

MEOR dengan biostimulasi, formulasi nutrisi merupakan sebuah langkah penting yang harus diperhatikan. Selain itu, teknis injeksi disesuaikan terhadap kondisi fasilitas dilapangan dan ketersediaan tenaga kerja di lapangan, seperti yang dijelaskan oleh Sen (2008).

3.3.1 Formulasi Nutrisi

Setelah melalui proses yang ekstensif dalam memilih ladang dan sumur, selanjutnya dilakukan formulasi nutrisi yang optimal untuk pertumbuhan mikroba indigen seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya. Pada penelitian sebelumnya yang sudah kami lakukan untuk sumur minyak bumi di Bentayan, formulasi nutrisi mikroba dilakukan dengan mengoptimasi molase, NPK, dan $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$ menggunakan RSM dengan dengan metode *Central Composite Design* (CCD) (Astuti et al., 2021). Variabel respons yang dianalisis adalah viskositas minyak mentah setelah masa inkubasi (Astuti et al., 2021). Penurunan viskositas menjadi respons kunci karena degradasi fraksi minyak berat yang diinginkan dilakukan oleh mikroba indigen dapat menurunkan viskositas minyak bumi dan mengakibatkan minyak lebih mudah mengalir sehingga lebih mudah diproduksi (Astuti et al., 2021).



Gambar 3.6 Hasil formulasi nutrisi injeksi MEOR dengan pendekatan RSM metode CCD tiga faktor (molase, NPK, DAP) terhadap respons viskositas minyak bumi (Astuti et al., 2021).

Kultivasi dilakukan dalam kondisi anaerobik dengan menggunakan medium berupa campuran 97% air formasi non-steril, 3% minyak mentah non-steril, dan sumber nutrisi steril. Kombinasi medium yang menghasilkan penurunan viskositas minyak yang paling tinggi merupakan hasil formulasi yang diinginkan (Astuti et al., 2021). Hasil optimasi formulasi nutrisi yang dievaluasi dari viskositas, seperti yang terlihat di Gambar 3.6, menunjukkan bahwa konsentrasi NPK berada pada rentang 0.12-0.36%, konsentrasi molease berada pada rentang 3-7%, dan diammonium fosfat (DAP) berada pada rentang 0.12-0.30% (Astuti et al., 2021).

3.3.2 Persiapan Injeksi Nutrisi dengan Pendekatan *Huff and Puff*

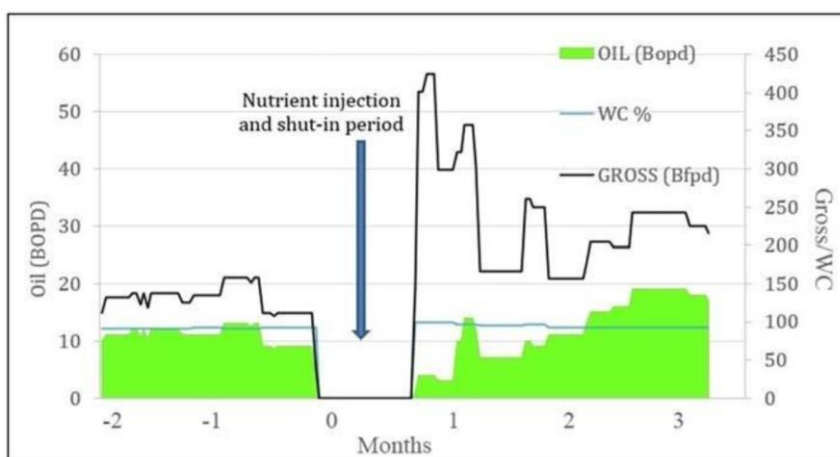
Pada aplikasi yang telah kami lakukan di sumur Bentayan, metode biostimulasi yang dilakukan adalah *Huff and Puff*. Injeksi nutrisi dilakukan dalam beberapa tahap, dimulai dari persiapan program injeksi, penyediaan nutrisi, persiapan fasilitas di permukaan, dan implementasi di lapangan (Ariadji et al., 2020). Pada studi lapangan di Bentayan, jumlah nutrisi yang diinjeksikan diperoleh dengan cara produksi nutrisi atau media yang telah dioptimasi berdasarkan hasil RSM sebelumnya. Sebagai larutan pencampur nutrisi dan pendorong saat proses injeksi digunakan air formasi (*brine water*). Terapat persyaratan bagi air formasi yang digunakan dalam proses injeksi, yaitu tidak boleh diolah secara kimiawi dengan menggunakan biosida untuk menghindari penghambatan pertumbuhan bakteri hidrokarbonoklastik. Bentayan merupakan sumur yang sudah tidak berproduksi lagi, sehingga fasilitas yang digunakan untuk injeksi nutrisi di Bentayan menggunakan peralatan lapangan untuk prosedur perbaikan dengan berbagai adaptasi untuk mendukung injeksi nutrisi. Sebelum dilakukan injeksi nutrisi sesungguhnya, dilakukan uji injeksi terlebih dahulu untuk menghitung laju injeksi yang optimal untuk memastikan nutrisi mencapai target (Astuti et al., 2017). Setelah semuanya berjalan dengan baik, injeksi dilakukan dengan menggunakan metode *Huff and Puff* (Ariadji et al., 2020).

3.3.3 Analisis Kinerja MEOR dengan Biostimulasi

Analisis kinerja produksi dilakukan untuk memeriksa keberhasilan proses MEOR. Kinerja produksi menampilkan kapasitas produksi kotor, total minyak, dan persen pemotongan air yang dicapai selama proses produksi. Biostimulasi dapat meningkatkan faktor mobilitas minyak mentah melalui

berbagai aktivitas mikroba seperti degradasi minyak, biosurfaktan, bio-emulsi, dan produksi asam. Oleh karena itu, setelah biostimulasi, *watercut* dapat menurun dan produksi minyak mentah dapat meningkat. Analisis kinerja produksi dapat dilakukan sekitar 3 bulan setelah injeksi nutrisi untuk melihat hasil yang signifikan (Ariadji et al., 2020).

Berdasarkan studi lapangan yang telah dilakukan selama periode pengamatan 3 bulan setelah injeksi nutrisi di lapangan Bentayan, persentase *watercut* menurun dari 99% menjadi 92%. Tingginya nilai rata-rata *watercut* pada awal periode pengamatan mengindikasikan rendahnya perolehan minyak mentah (Weidong et al., 2014). Pada bulan ketiga setelah biostimulasi, penurunan *watercut* juga diiringi dengan peningkatan akumulasi perolehan minyak mentah (Gambar 3.7) (Astuti et al., 2021).



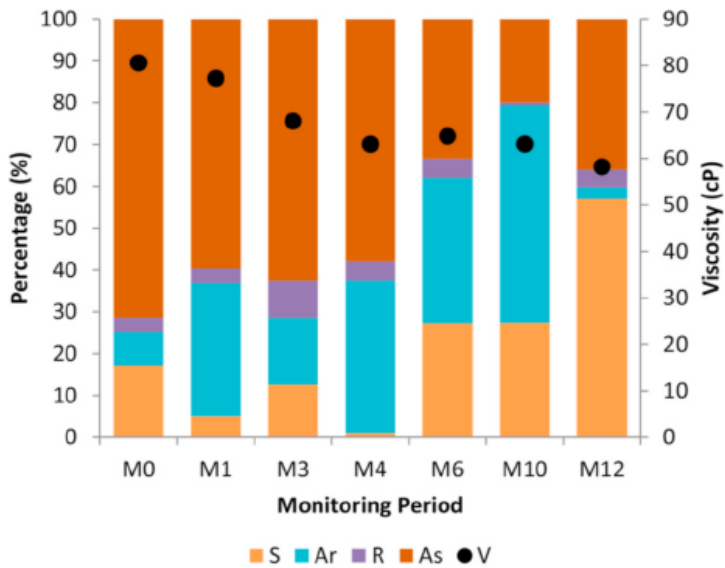
Gambar 3.7 Total kapasitas produksi kotor, *watercut*, dan minyak yang diperoleh di sumur B2 sebelum dan setelah biostimulasi (Ariadji et al., 2020).

Aktivitas bakteri yang distimulasi oleh injeksi nutrisi mampu menurunkan IFT dan viskositas minyak mentah, sehingga meningkatkan mobilitas minyak. Komunitas bakteri yang ada juga dapat menghasilkan asam, yang dapat mengubah permeabilitas batuan reservoir. Hal ini memungkinkan pengurangan air dan peningkatan perolehan produksi minyak (Ariadji et al., 2020). Evaluasi kinerja selanjutnya dipantau berdasarkan analisis karakteristik minyak bumi dan performa pertumbuhan mikroba.

a. Analisis karakteristik minyak bumi

Aktivitas mikroba dalam menggunakan substrat hidrokarbon dapat memicu berbagai perubahan karakteristik fisik seperti berkurangnya tegangan

antarmuka (IFT) dan viskositas (Youssef et al., 2009). Aktivitas mikroba dan perubahan properti minyak dapat diamati dengan menganalisis karakteristik fisik minyak bumi seperti viskositas, komposisi fraksi hidrokarbon, dan tegangan antarmuka pada kondisi sebelum dan sesudah proses biostimulasi (Shibulal et al., 2018). Bakteri petrofilik sendiri memiliki kemampuan yang berbeda dalam mendegradasi hidrokarbon tergantung dari jenis enzim yang dimilikinya. Umumnya, urutan kemudahan degradasi hidrokarbon dimulai dari dari fraksi jenuh yang paling sederhana ke fraksi yang lebih kompleks, yaitu fraksi aromatik, resin, hingga aspal secara berurutan (Hao and Lu, 2007). Degradasi dari senyawa hidrokarbon yang lebih kompleks serta dihasilkannya metabolit berupa biosurfaktan dan bio-emulsifier dapat menurunkan viskositas minyak serta tegangan antarmuka minyak dan air (Ariadji et al., 2017).



Gambar 3.8 Perubahan komposisi fraksi minyak bumi selama periode pemantauan; S: saturated, Ar: aromatic, R: resinic, As: Asphaltic, V: viscosity (Astuti et al., 2021).

Dalam studi lapangan MEOR yang dilakukan di Bentayan, sumur minyak ditutup selama empat minggu setelah injeksi nutrisi untuk proses stimulasi. Kemudian dilanjutkan dengan pengambilan sampel pertama untuk pemantauan (Astuti et al., 2021). Pengambilan sampel dilakukan selama tiga bulan periode pemantauan, dua kali seminggu di bulan pertama dan seminggu sekali di bulan-bulan berikutnya. Pada periode pemantauan diamati perubahan sifat kimia dari sampel minyak yang ditentukan dengan

analisis fraksi hidrokarbon dan kromatografi gas-spektrometri massa (GC-MS) (Ariadji et al., 2017). Hasil pengukuran beberapa sifat fisika dan kimia minyak bumi dapat dilihat pada Gambar 3.8. Pada periode yang sama, analisis dinamika populasi mikroba indigen juga dilakukan (Astuti et al., 2021).

Analisis fraksi hidrokarbon selama periode pemantauan menunjukkan bahwa fraksi jenuh meningkat secara bersamaan dengan penurunan fraksi aspal. Hal ini menunjukkan bahwa mikroba indigen terstimulasi untuk mendegradasi fraksi berat hidrokarbon dan mengubah komposisi fraksi minyak secara keseluruhan. Hal ini sejalan dengan peningkatan total jumlah mikroba, terutama bakteri hidrokarbonoklastik (Astuti et al., 2021). Pada Gambar 3.8 juga dapat diamati bahwa degradasi bertahap yang terjadi selama kurun waktu pemantauan juga menurunkan viskositas dinamik dari minyak dan juga tegangan antarmuka (IFT). Penurunan IFT dapat disebabkan oleh produksi biosurfaktan dan bioemulsifier yang meningkat akibat injeksi nutrisi tersebut (Banat et al., 2000). Produksi biosurfaktan dan emulsifier juga mengindikasikan bahwa bakteri sudah mulai menggunakan minyak bumi sebagai substrat untuk metabolismenya setelah molase (Astuti et al., 2021).

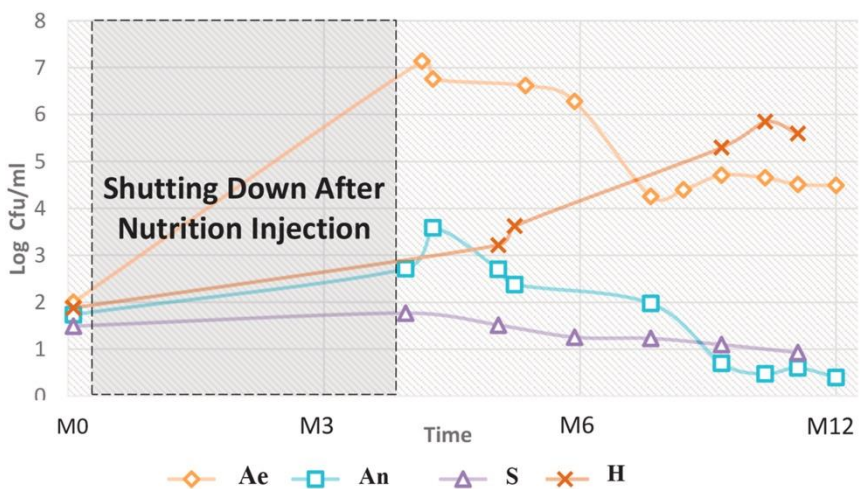
b. Perubahan kelimpahan dan diversitas mikroba

Analisis mikrobiologi merupakan salah satu parameter pemantauan yang dilakukan untuk mengamati pengaruh injeksi nutrisi terhadap pertumbuhan mikroba (Kögler et al., 2017). Kelimpahan mikroba dapat menunjukkan aktivitas bakteri dalam proses MEOR. Terdapat dua metode yang dapat digunakan untuk mengkuantifikasi kepadatan dan keragaman mikroba, yaitu dengan pendekatan mikroba yang dapat dikultur dan analisis metagenomik.

1. Analisis Mikroba yang dapat dikulturkan (*culture dependent*)

Metode enumerasi seperti *standard plate count* dapat dilakukan untuk memperkirakan jumlah total bakteri aerobik, anaerobik, hidrokarbonoklastik, dan bakteri pereduksi sulfat (SRB) (Astuti et al., 2021). Implementasi biostimulasi *huff and puff* di Lapangan Bentayan menghasilkan peningkatan total bakteri selama periode pemantauan tiga bulan dibandingkan dengan jumlah sebelum injeksi (Gambar 3.9). Terjadi peningkatan jumlah total bakteri aerobik dan hidrokarbonoklastik/petrofilik serta penurunan bakteri anaerobik dan SRB. Total bakteri aerob meningkat dari $7,53 \times 10^2$ CFU/ml menjadi $1,17 \times 10^7$ CFU/ml setelah biostimulasi. Jumlah tersebut mencapai puncaknya pada bulan pertama pemantauan dan turun

menjadi $2,3 \times 10^5$ CFU/ml selama dua bulan pemantauan lapangan berikutnya (Ariadji et al., 2020). Penurunan pertumbuhan menjelang akhir bulan pertama dapat terjadi akibat menurunnya ketersediaan sumber karbon dan nitrogen sederhana di dalam sumur (Astuti et al., 2021). Penggunaan oksigen oleh mikroba aerobik, serta suhu dan tekanan yang tinggi di dalam sumur juga dapat menekan konsentrasi oksigen terlarut dalam fluida sumur, sehingga menciptakan lingkungan yang anoksik (Wenger et al., 2002). Bakteri aerobik tidak mampu tumbuh pada kondisi ini, sehingga pertumbuhannya akan tertekan dan digantikan oleh bakteri anaerobik yang meningkat pertumbuhannya hingga bulan kedua pemantauan (Astuti et al., 2021).



Gambar 3.9 Hasil monitoring kelimpahan bakteri terkultur selama aplikasi MEOR dengan bioaugmentasi di lapangan Bentayan. (Ket: Ae: bakteri aerobik; An: bakteri anaerobik; S: bakteri SRB, H: bakteri hidrokarbonoklastik; M: minggu ke-) (Astuti et al., 2022).

Pertumbuhan bakteri hidrokarbonoklastik menunjukkan pola yang sedikit berbeda dengan bakteri aerob heterotrof. Meskipun pertumbuhan bakteri hidrokarbonoklastik lebih lambat, tetapi terjadi peningkatan selama pemantauan, dari $7,1 \times 10^2$ CFU/ml menjadi $4,05 \times 10^5$ CFU/ml selama tiga bulan. Pada bulan-bulan pertama ketika molase berlimpah, bakteri indigen akan menggunakan molase dalam metabolisme utama mereka dan bukan minyak bumi karena sistem represi katabolit yang kuat oleh gula sederhana, yang lebih cepat digunakan sebagai substrat metabolisme (Tobalina et al., 2015). Namun, ketika nutrisi dalam bentuk gula sederhana yang disuntikkan ke dalam reservoir habis, bakteri yang telah terinduksi pertumbuhannya dalam jumlah besar akan mulai menggunakan minyak sebagai substrat karbon utama mereka. Fenomena ini dapat dikenali dari pola pertumbuhan

bakteri hidrokarbonoklastik yang semakin meningkat secara bertahap menjelang bulan ketiga akibat menipisnya molase. Secara keseluruhan, peningkatan total bakteri aerobik dan bakteri hidrokarbonoklastik menunjukkan keampuhan nutrisi yang dipilih (molase, NPK, dan $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$) untuk menginduksi pertumbuhan bakteri indigen (Astuti et al., 2017).

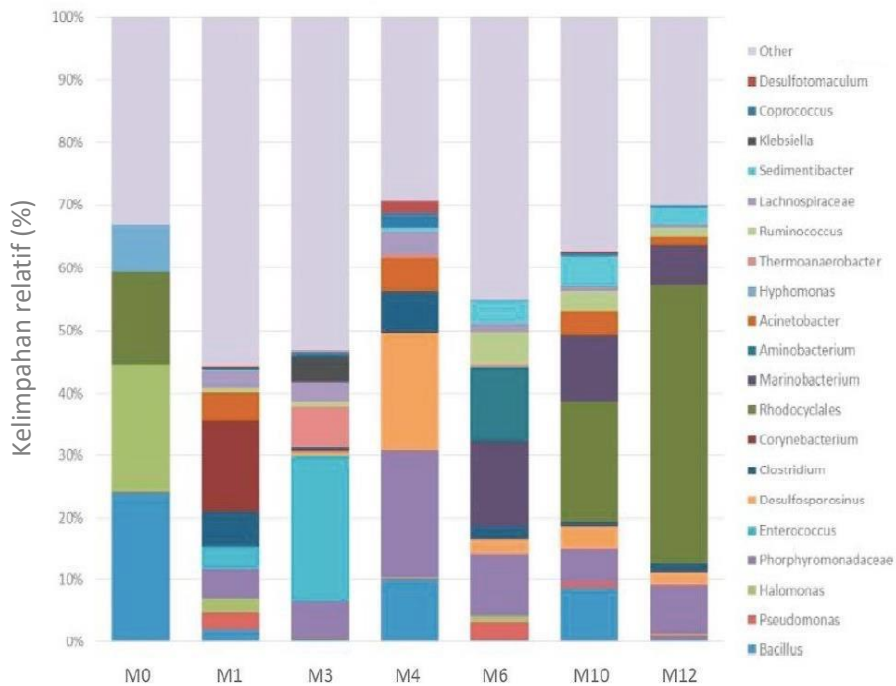
Khusus untuk pertumbuhan bakteri SRB, pada studi biostimulasi Lapangan Bentayan, jumlah mikroba dapat dijaga berada pada jumlah yang rendah, yaitu dari jumlah awal sekitar 11 CFU/ml menjadi 1 CFU/ml dan tetap konstan selama periode pemantauan. Hal ini sesuai dengan salah satu tujuan dari proses biostimulasi, yaitu menekan bakteri yang merugikan dan mendukung pertumbuhan bakteri yang menguntungkan (Singh et al., 2019). Pengurangan jumlah SRB berkorelasi dengan penurunan risiko pengasaman endapan dan produksi H_2S akibat biokorosi bakteri (Lee et al., 2009).

2. Analisis Mikroba dengan pendekatan Metagenomik (*culture independent*)

Analisis metagenomik dilakukan dengan mengekstraksi DNA bakteri dari sampel air formasi. Memantau komposisi komunitas bakteri dan menentukan fungsinya penting untuk mengevaluasi proses pengolahan biostimulan. Sebagian besar genus yang ditemukan di lapangan termasuk dalam filum Firmicutes dan Proteobacteria. Rincian genus pada Filum Firmicutes adalah *Bacillus*, *Desulfosporosinus*, *Enterococcus*, *Desulfotomaculum*, *Clostridium*, *Thermoanaerobacter*, *Lysinibacillus*, *Coprococcus*, *Ruminococcus*, *Geosporobacter*, *Lachnospiraceae*, dan *Thermoanaerobacterium*. Sementara itu, Rincian genus pada filum Proteobacter adalah *Enterobacter*, *Rhodocyclaceae*, *Halomonas*, *Shewanella*, *Acinetobacter*, *Marinobacterium*, *Xanthomonadaceae*, *Hyphomonas*, *Pseudomonas*, dan *Achromobacter* (Astuti et al., 2021). Sebagian besar dari filum ini berasal dari endapan minyak dan telah diketahui memiliki kemampuan untuk menguraikan hidrokarbon secara aerobik maupun anaerobik (Lin et al., 2014).

Data metagenomik menunjukkan perubahan komunitas bakteri sebelum dan sesudah proses biostimulasi. Komunitas mikroba berubah secara dinamis selama proses biostimulasi. Bakteri yang terdeteksi pada hari pertama, kedua, dan bahkan ketiga setelah proses injeksi nutrisi berbeda (gambar 3.10). Sebelum proses biostimulasi (M0), beberapa bakteri yang tumbuh dominan di dalam komunitas adalah *Halomonas*, *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Xanthomonadaceae*, *Hyphomonas*, *Rhodocyclales*, *Dietzla*, *Parvibaculum*,

Ammoniphilus, *Lysinibacillus*, dan *Anoxybacillus*. Hal ini mengindikasikan bahwa beberapa bakteri asli yang disebutkan di atas dapat menggunakan hidrokarbon sebagai sumber karbon di dalam reservoir.



Gambar 3.10 Perubahan komposisi komunitas bakteri di dalam sumur minyak bumi selama periode pemantauan selama biostimulasi di Lapangan Bentayan selama 3 bulan (M: minggu ke-) (Astuti et al., 2021).

Setelah proses injeksi nutrisi (M1), analisis metagenomik perubahan komunitas bakteri dibandingkan dengan sebelum injeksi nutrisi. Hanya *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan *Halomonas* yang teramati pada minggu pertama setelah biostimulasi, meskipun dengan frekuensi yang relatif lebih rendah. *Escherichia coli*, *Clostridium*, *Actinomyces*, *Coprococcus*, *Enterococcus*, *Porphyromonadaceae*, *Klebsiella*, dan *Ruminococcus* mungkin muncul sebagai fermentor molase. Injeksi molase, NPK, dan $(\text{NH}_4)_2$, HPO_4 menyediakan sumber nutrisi untuk bakteri yang tumbuh cepat dibandingkan dengan bakteri lain sebelum injeksi. Fermentasi molase oleh bakteri indigen di dalam reservoir akan menghasilkan asam yang dapat menurunkan nilai pH dan menginduksi emulsifikasi minyak dan air formasi (Ariadji dkk., 2017; Lin dkk., 2014; Sekhon dkk., 2012). Fenomena ini dapat dilihat dari pengukuran pH dan IFT, di mana pH turun dari 9,20 menjadi 6,53 dan IFT turun dari 27,1 menjadi 22,8 dynes/cm (Ariadji et al., 2020).

Pada minggu ketiga (M3) setelah proses biostimulasi, *Enterococcus* muncul sebagai genus dominan, sementara *Escherichia coli*, *Halomonas*, *Shewanella*, dan *Acinetobacter* yang dominan pada M1 tidak ada. Selain itu, *Desulfosporosinus* yang mampu menggunakan hidrokarbon dan *Thermoanaerobacter* mulai dapat teridentifikasi. *Desulfosporosinus* adalah SRB yang mampu mendegradasi fraksi hidrokarbon jenuh dan mengubah sifat minyak mentah. Aktivitas penguraian ini dibuktikan dari hasil viskositas minyak yang terus menurun selama periode pemantauan (Ariadji et al., 2020). SRB ini dapat menimbulkan korosi pada pipa dan struktur logam lainnya. Pertumbuhannya pertama kali teramati pada minggu ketiga setelah injeksi nutrisi dan menurun secara signifikan pada akhir periode pemantauan (12 minggu setelah injeksi nutrisi). Kondisi ini menunjukkan bahwa nutrisi yang diinjeksikan berhasil menghambat pertumbuhan SRB. Sementara itu, produksi biosurfaktan oleh *Bacillus*, *Acinetobacter*, dan *Pseudomonas* pada mampu menurunkan nilai IFT (Lin dkk., 2014; Sekhon dkk., 2012; Wu dkk., 2016; Andersen dkk., 2015).

Setelah 4 minggu proses injeksi nutrisi, terlihat bahwa *Desulfosporosinus*, *Bacillus*, *Halomonas*, *Pseudomonas*, dan *Acinetobacter* kembali terlihat dan melebihi kelimpahan awal mereka sebelum proses biostimulasi. Seperti pada tahap pertama, sebagian besar spesies yang muncul selama minggu ini dapat mengurai hidrokarbon. Kemunculan kembali bakteri hidrokarboklastik dapat diakibatkan oleh terbatasnya konsentrasi molase. Hal ini menurunkan pertumbuhan bakteri yang hanya mampu menggunakan molase sebagai sumber karbon. Perubahan nitrat menjadi nitrit dan degradasi molase juga dapat menekan pertumbuhan SRB (Sherry et al., 2013; Linda dan Bouziane, 2012).

Rhodocyclales dan *Marinobacterium* adalah genera yang paling banyak ditemukan dari minggu ke-6 hingga minggu ke-12 dari proses pemantauan. Kelimpahan *Rhodocyclales* selama minggu-minggu ini mencerminkan situasi sebelum injeksi nutrisi. Secara umum, kondisi *reservoir* dan ketersediaan nutrisi sebanding dengan kondisi sebelum biostimulasi, meskipun bakteri pengurai hidrokarbon ditemukan dalam jumlah dan keragaman yang lebih tinggi. Bakteri hidrokarbonoklastik yang muncul dapat menghasilkan fraksi hidrokarbon ringan, sehingga mengurangi viskositas minyak dan IFT serta meningkatkan perolehan minyak (Lin et al., 2014).

Berdasarkan hasil analisis keragaman komunitas bakteri, terdapat kemiripan keragaman komunitas sebelum dan sesudah injeksi nutrisi. Hal ini menunjukkan bahwa biostimulasi secara signifikan memengaruhi komunitas dengan memberikan keuntungan selektif pada bakteri non-hidrokarbonoklastik. Hal ini membuktikan injeksi nutrisi dapat menstimulasi komunitas mikroba hidrokarbonoklastik pada sumur minyak bumi selama aplikasi MEOR.

4 TANTANGAN APLIKASI MEOR DI MASA DEPAN

Saat ini masih banyak tantangan dalam aplikasi MEOR sehingga belum secara luas digunakan oleh industri minyak bumi. Hal ini disebabkan oleh kompleksitas dari mekanisme MEOR itu sendiri serta juga lingkungan reservoir yang sangat beragam yang dapat memengaruhi pertumbuhan dan aktivitas mikroba di dalam sumur minyak bumi. Keberhasilan dari MEOR sendiri juga saat ini masih dapat ditingkatkan. Oleh karena itu sangat penting untuk menggali lebih lanjut, melakukan penelitian yang lebih mendalam serta melakukan analisis yang tepat agar di masa yang akan datang teknologi ini dapat digunakan dengan lebih baik dan dapat mereduksi resiko yang disebabkan oleh faktor-faktor yang saat ini masih sulit dikontrol.

Pemahaman yang baik mengenai mekanisme mikroba dalam menggunakan substrat hidrokarbon, regulasi atau pengendalian metabolismenya serta pengetahuan mengenai bagaimana komunitas mikroba di dalam reservoir berinteraksi akan dapat membantu untuk mengatasi tantangan tersebut. Pendekatan metode-metode terbaru di antaranya *Next Generation Sequencing* (NGS) dapat menjelaskan lebih baik mengenai tidak saja mikroba yang dapat diisolasi dari sumur minyak bumi, tetapi juga mikroba *unculturable* yang ada di dalam sumur minyak bumi, peran dan fungsi fisiologisnya. Hal ini dapat memberikan gambaran lebih jelas bagaimana suatu proses stimulasi dapat memengaruhi dinamika populasi mikroba di dalam sumur sehingga stimulasi dapat dilakukan secara lebih selektif terhadap kelompok mikroba tertentu yang bermanfaat dalam meningkatkan perolehan minyak serta menghambat pertumbuhan kelompok mikroba yang dapat menurunkan efektivitas MEOR.

Tantangan berikutnya adalah kepercayaan dari industri perminyakan di Indonesia untuk dapat mengimplementasikan teknologi ini. Selama ini, teknologi MEOR masih diterapkan di sumur-sumur marginal. Di luar Indonesia telah mulai banyak implementasi MEOR dan memberikan hasil yang baik. Dengan pengetahuan dan pemahaman yang lebih baik mengenai pertumbuhan serta interaksi mikroba di dalam reservoir, ke depan kita dapat lebih percaya diri dalam mengimplementasikan teknologi ini.

5 UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur dipanjatkan kepada Allah Swt., atas limpahan rahmat, petunjuk, dan karunia-Nya sehingga saya mendapatkan amanah sebagai Guru Besar di bidang Mikrobiologi Industri di Institut Teknologi Bandung. Semoga saya dapat menjalankan amanah ini dengan sebaik mungkin dan penuh tanggung jawab. Aamiin.

Pencapaian jabatan akademik ini melibatkan dukungan dan kerja sama dari banyak pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini, izinkanlah saya menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Pimpinan ITB, Forum Guru Besar, Senat Akademik dan Civitas Akademik Institut Teknologi Bandung atas kesempatan, kepercayaan dan dukungan untuk melaksanakan tugas Tridharma PT sejak tahun 1996.
2. Para guru sejak SD-SMP-SMA serta para dosen dan senior di Biologi maupun di ITB yang telah berbagi ilmu, mendidik dan membimbing dengan tulus. Juga para pembimbing saya Prof. Dr. Kosasih Padmawinata (alm), Prof. Dr. Muhamad Wirahadikusumah (alm), Prof. Ir. Ibrahim Sastramihardja (alm), dan Prof. Dr. Soetijoso Soemitro (alm), semoga Allah Swt. membalas kebaikan serta kesabaran dalam mengajarkan ilmu dengan balasan yang berlipat ganda.
3. Rekan-rekan dosen bidang Mikrobiologi yang membina dan menyertai karier saya sejak saya diterima sebagai dosen ITB: Drs. Unus Suriawiria (alm), Dra. Nuryati Juli, MS, Prof. Dr. Pingkan Aditiawati, dan Prof. Dr. Nyoman P. Aryantha. Rekan-rekan di KK Bioteknologi Mikroba, terima kasih atas interaksinya yang baik serta dorongan dan diskusi yang selalu bersifat membangun di KK, dan juga seluruh rekan dosen maupun tenaga kependidikan di SITH yang telah membuat suasana kerja di SITH dan ITB menjadi sangat menyenangkan sehingga dapat menghasilkan karya-karya secara produktif.
4. Rekan-rekan peneliti di Tim MEOR ITB serta OGRINDO ITB beserta seluruh asisten peneliti dan mahasiswa atas dorongan, kerja sama dan juga atas kesediaan berbagai suka duka selama mengerjakan riset MEOR ITB, khususnya untuk mentor Prof. Dr. Septoratno Siregar, Prof. Dr. Pingkan Aditiawati, Prof. Dr. Tutuka Ariadji, dan Dra. Nuryati Juli, MS.

Juga terima kasih untuk Dr. Isty Adithya Purwasena yang bersama-sama mengembangkan mata kuliah dan riset terkait mikrobiologi minyak bumi.

5. Para Guru besar yang telah memberikan rekomendasi Prof. Dr. Pingkan Aditiawati, Prof. Dr. Nyoman P. Aryantha, Prof. Dr. Tati S. Subahar, Prof. Dr. Tutuka Ariadji, Prof. Dr. Astri Rinanti (Universitas Trisakti), dan Prof. Dr. Eiichiro Fukusaki (Osaka University).
6. Kolega peneliti dan mitra kerja sama atas segala dukungan yang diberikan sehingga dapat terwujud kegiatan penelitian yang produktif.
7. Teman-teman dari masa kecil sampai sekarang di TK/SD Moestopo, SMP 5 Bandung, SMA 3 Bandung, dan Jurusan Biologi ITB yang ikut mewarnai perjalanan saya, terima kasih atas kebersamaan, pertemanan, dan persahabatan selama ini.

Selanjutnya, secara khusus, ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada:

1. Orang tua tercinta, alm. Bapak Sunaryo Dachlan dan Ibu Gularti Soeworo, serta bapak dan ibu mertua, Bapak Sumirato Reka Rio dan almh. Ibu Ike Salsiah Moestaram atas kasih sayang, didikan, teladan dan doa yang tidak putus-putus kepada saya, semoga Allah Swt. senantiasa memberikan rahmat dan kasih sayangnya untuk orang tua dan mertua tercinta
2. Suami tercinta Andrianto Prabowo Rio yang selalu setia mendampingi dan memberikan dukungan yang sangat besar kepada saya dalam menjalankan karier sampai di titik ini. Untuk anak-anak tersayang, Irshad Adriatama dan Rifki Adriarshad, terima kasih sudah mengajarkan kami bagaimana menjadi orang tua dan selalu menjadi sumber semangat terbesar Mami.
3. Kel. besar Soeworo Wirjoseputro, Kel. besar Achmad Dachlan, Kel. besar Moestaram dan Kel. besar Doriat Suko Rio atas kasih sayang dan kehangatan keluarga, dukungan dan doa-doanya selalu.

Terima kasih juga saya sampaikan kepada semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang secara langsung maupun tidak langsung telah berkontribusi pada pencapaian ini. Semoga ilmu yang dikembangkan dapat bermanfaat untuk banyak pihak dan semoga Allah Swt. membalas semua kebaikan yang telah diberikan oleh seluruh pihak yang membantu dan mendukung dengan tulus.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditama, P., Avbelj, E., Reimann, S., Dopffel, N., Mahler, E., Poulsen, M., Jelinek, W., & Alkan, H. (2017). Design and execution of an MEOR Huff and Puff pilot in a wintershall field. In Society of Petroleum Engineers *SPE Europec Featured at 79th EAGE Conference and Exhibition* (pp. 549562). <https://doi.org/10.2118/185785-MS>.
- Aladasani, A., & Bai, B. (2010). Recent developments and updated screening criteria of enhanced oil recovery techniques. *SPE-130726-MS*. <https://doi.org/10.2118/130726-MS>.
- Alkan, H., Klueglein, N., Mahler, E., Koçgler, F., Beier, K., Jelinek, W., Herold, A., Hatscher, S., & Leonhardt, B. (2016). An integrated German MEOR project, update: Risk management and Huff'n Puff design. *Proceedings SPE symposium on improved oil recovery, January 2016*. Available from <https://doi.org/10.2118/179580-MS>.
- Alvarado, V., & Manrique, E. (2010). Enhanced oil recovery: An update review. *Energies*, 3(9), 15291575. Available from <https://doi.org/10.3390/en3091529>, MDPI AG.
- Andersen, R. L., Jensen, K. M., & Mikkelsen, M. J. (2015). Continuous ethanol fermentation of pretreated lignocellulosic biomasses, waste biomasses, molasses and syrup using the anaerobic, thermophilic bacterium *Thermoanaerobacter italicus* Pentocrobe 411. *PLoS One*, 10(8)e0136060. Available from <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136060>.
- Ariadji, T., Astuti, D.I., Aditiawati, P., Purwasena, I.A., Persada, G.P., Soeparmono, M.R., Amirudin, N.H., Ananggadipa, A.A., Sasongko, S.Y., Abqory, M.H., Ardianto, R.N., 2017. Microbial huff and puff project at Mangunjaya field wells: the first in Indonesia towards successful MEOR implementation. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers *SPE-186361-MS*. <https://doi.org/10.2118/186361-MS>.
- Ariadji, T., Astuti, D.I., Priharto, N., Ananggadipa, A.A., Persada, G.P., Subiantoro, E., Erwanto, P.E., & Abqory, M.H. (2020). Field implementation of nutrient Huff and Puff in Bentayan field, South Sumatera: Towards a low-cost EOR. Society of petroleum engineers

SPE/IATMI Asia Pacific oil and gas conference and exhibition 2019, APOG 2019. Available from <https://doi.org/10.2118/196536-MS>.

Astuti, D.I, Rahmatunisa, N., Kamarisima, , Nugroho, G.G.S., Suhardi, V.S.H., and Taufik. I. 2022. Enhancement of Biosurfactant Production by Bacteria Isolated from Crude Oil through Adaptation Laboratory Evolution. *Geomicrobiology Journal*, Vol 40, Issue 2

Astuti, D.I., Ariadji, T., Purwasena, I.A., Aditiawati, P., Afinanisa, Q., Abqory, M.H., Erwanto. P.E. 2023. Biostimulation in Microbial Enhanced Oil Recovery: From Laboratory Analysis and Nutrient Formulation to Field Monitoring. In: *Challenges and Recent Advances in Sustainable Oil and Gas Recovery and Transportaion*. Editor Joshi,S., Jadhawar P., and Kumar, A. Gulf Professional Publishing, Elsevier. ISBN 978-0-323-99304-3

Astuti, D.I., Ariadji, T., Aditiawati, P., Purwasena, I.A., Persada, G.P., Ananggadipa, A.A., Dewi, U.R., Khendarsyah, D.D., Rizki, R., Abqory, M.H., & Ardianto, R.N. (2017). A comprehensive preparation study for microbial nutrient injection of microbial enhanced oil recovery: Reservoir screening and laboratory analysis Case study Bentayan field. In Society of petroleum engineers *SPE/IATMI Asia Pacific oil and gas conference and exhibition 2017*, January 2017. Available from <https://doi.org/10.2118/186249-MS>.

Astuti, D.I., Purwasena, I.A., Satrio, G.G., Andika, K.R., Millati, G.Z., Dwiningrum, T.W., and Meriani, E. 2020. Optimization of Enrichment and Isolation Media of Thermophilic Hydrocarbonoclastic Bacteria Isolated from Oil Reservoir of West Java for Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) Application. *Sains Malaysiana* 49(9)(2020): 2129-2139

Astuti, D.I., Purwasena, I.A., Putri, R.E., Amaniyah, M., Sugai, Y. 2019. Screening and characterization of biosurfactant produced by *Pseudoxanthomonas* sp. G3 and its applicability for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 9(3), pp. 2279-2289

Banat, I., Makkar, R. S., & Cameotra, S. S. (2000). Potential commercial applications of microbial surfactants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53(5), 495508, Springer Verlag. Available from <https://doi.org/10.1007/s002530051648>.

- Bragg R, Jansen A, Coetzee M, van der Westhuizen W, Boucher C. 2014. Bacterial resistance to quaternary ammonium compounds (QAC) disinfectants. *Adv Exp Med Biol* 808:1–13.
- Brown LR. 2010. Microbial Enhanced Oil recovery (MEOR). *Curr Opi Microbiol.* 13(3): 316-320. doi: 10.1016/j.mib.2010.01.011
- Bryant, R.S. (1990). Screening criteria for microbial for processes. OSTI GOV. OSTI ID: 6220011. Available from <https://doi.org/10.2172/6220011>.
- Dhasayan A, Kiran GS, Selvin J (2014) Production and characterisation of glycolipid biosurfactant by *Halomonas* sp. MB-30 for potential application in enhanced oil recovery. *J Appl Biochem Biotechnol* 174(7):2571–2584
- Gautam KK, Tyagi VK (2006) Microbial surfactants: a review. *J Oleo Sci* 55(4):155–166
- Gerba CP. 2015. Quaternary ammonium biocides: efficacy in application. *Appl Environ Microbiol* 81(2):464–469.
- Guo, H., Li, Y., Yiran, Z., Wang, F., Wang, Y., Yu, Z., Haicheng, S., Yuanyuan, G., Chuyi, J., & Xian, G. (2015). Progress of microbial enhanced oil recovery in China. In Society of petroleum engineers *SPE Asia Pacific enhanced oil recovery conference, EORC 2015 (14221437)*. <https://doi.org/10.2118/174697-ms>.
- Ismail W, el Nayal AM, Ramadan AR, Abotalib N. 2014. Sulfur source-mediated transcriptional regulation of the *rhlABC* genes involved in biosurfactants production by *Pseudomonas* sp. strain AK6U. *Front Microbiol* 5:423.
- Jing W, Guang J, Jing T, Hongdan Z, Hanping D, Li Y (2011) Functional characterization of a biosurfactant-producing thermo-tolerant bacteria isolated from an oil reservoir. *Pet Sci* 8:353–356
- Khire JM (2010) Bacterial biosurfactants, and their role in microbial enhanced oil recovery (MEOR). In: Ramkrishna S (ed) *Biosurfactants*. Landes Bioscience and Springer Science + Business Media, New York, pp 146–157
- Knauf GA, Cunningham AL, Kazi MI, Riddington IM, Crofts AA, Cattoir V, Trent MS, Davies BW. 2018. Exploring the antimicrobial action of quaternary amines against *Acinetobacter baumannii*. *MBio* 9(1):e02394-17.

- Koçgler, F., Dopffel, N., Mahler, E., & Alkan, H. (2017). Dynamic screening for microbial enhanced oil recovery (MEOR). *IOR NORWAY 2017 19th European Symposium on Improved Oil Recovery: Sustainable IOR in a Low Oil Price World*, 2017(1), 114. Available from <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201700235>.
- Lake, L.W., Stock, L.G., & Lawson, J.B. (1978). Screening estimation of recovery efficiency and chemical requirements for chemical flooding. SPE-7069-MS (pp. 333-344). <https://doi.org/10.2118/7069-MS>
- Lazar, I., Petrisor, I. G., & Yen, T. F. (2007). Microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Petroleum Science and Technology*, 25(11), 13531366. Available from <https://doi.org/10.1080/10916460701287714>.
- Lee, W., Lewandowski, Z., Nielsen, P. H., & Hamilton, W. A. (2009). Role of sulfate-reducing bacteria in corrosion of mild steel: A review. *The Journal of Bioadhesion and Biofilm Research*, 8(3), 165194. Available from <https://doi.org/10.1080/08927019509378271>.
- Lin, J., Hao, B., Cao, G., Wang, J., Feng, Y., Tan, X., & Wang, W. (2014). A study on the microbial community structure in oil reservoirs developed by water flooding. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122, 354359. Available from <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.07.030>.
- Linda, A., & Bouziane, A. (2012). Petroleum-oil biodegradation by *Corynebacterium aquaticum* and *Pseudomonas aeruginosa* strains isolated from the industrial rejection of the refinery of ARZEW-Algeria. *World Applied Sciences*, 18(8), 11191123. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.08.734>.
- Liu J-F, Mbadinga S, Yang S-Z, Gu J-D, Mu B-Z. 2015. Chemical structure, property and potential applications of biosurfactants produced by *Bacillus subtilis* in petroleum recovery and spill mitigation. *Int. J. Mol. Sci.*, 16(3):4814–4837.
- Liu X, Xu J, Zhu J, Du P, Sun A. 2019. Combined transcriptome and proteome analysis of rpoS regulon reveals its role in spoilage potential of *Pseudomonas fluorescens*. *Front Microbiol* 10:94.
- Mcinerney MJ, Han SO, Maudgalya S, Mouttaki H, Folmsbee M, Knapp R, Nagle D, Jackson BE, Stuardt M, Frey W (2003) *Development of more effective biosurfactants for enhanced oil recovery*. (No. DOE/BC/15113-2). National

Petroleum Technology Office, U.S. Department of Energy. Tulsa, Oklahoma, USA

- Niu, J., Liu, Q., Lv, J., & Peng, B. (2020). Review on microbial enhanced oil recovery: Mechanisms, modelling and field trials. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 192, 107350. Available from <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2020.107350>.
- Patel, J., Borgohain, S., Kumar, M., Rangarajan, V., Somasundaran, P., & Sen, R. (2015). Recent developments in microbial enhanced oil recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 15391558, Elsevier Ltd. Available from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.135>.
- Sekhon, K. K., Khanna, S., & Cameotra, S. S. (2012). Biosurfactant production and potential correlation with ester-ase activity. *Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology*, 3(133), 104172. Available from <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000133>.
- Sherry, A., Gray, N. D., Ditchfield, A. K., Aitken, C. M., Jones, D. M., Roling, W. F. M., Hallmann, C., Larter, S. R., Bowler, B. F. J., & Head, I. M. (2013). Anaerobic biodegradation of crude oil under sulphate-reducing conditions leads to only modest enrichment of recognized sulphate-reducing taxa. *Journal of Petroleum and Environmental Biotechnology*, 81, 105113. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2012.04.009>.
- Singh, P., Patil, Y., & Rale, V. (2018). Biosurfactant production: Emerging trends and promising strategies. *Journal of Applied Microbiology*, Volume 126, Issue 1, 2–13. <https://doi.org/10.1111/jam.14057>
- Sun G, Hu J, Wang Z, Li X, Wang W (2018) Dynamic investigation of microbial activity in microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Petrol Sci Technol*, 36(16):1–7
- Tezel U, Pavlostathis SG. 2015. Quaternary ammonium disinfectants: microbial adaptation, degradation and ecology. *Curr Opin Biotechnol*, 33:296–304.
- Tobalina, L., Bargiela, R., Pey, J., Herbst, F.-A., Lores, I., Rojo, D., Barbas, C., Peláez, A. I., Sánchez, J., von Bergen, M., Seifert, J., Ferrer, M., & Planes, F. J. (2015). Context-specific metabolic network reconstruction of a naphthalene-degrading bacterial community guided by metaproteomic data. *Bioinformatics*, 31(11), 17711779. Available from <https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTV036>.

- Urry L, Cain M, Minorsky P, Wasserman S, Reece J. 2016. *Campbell Biology*. 11th ed. Hoboken, NJ: Pearson Higher Education; p491–499.
- Walton JT, Hill DJ, Protheroe RG, Nevill A, Gibson H. 2008. Investigation into the effect of detergents on disinfectant susceptibility of attached *Escherichia coli* and *Listeria monocytogenes*. *J Appl Microbiol*, 105(1):309–315.
- Wenger, L. M., Davis, C. L., & Isaksen, G. H. (2002). Multiple controls on petroleum biodegradation and impact on oil quality. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 5(05), 375383. Available from <https://doi.org/10.2118/80168-PA>.
- Wu, M., Dick, W. A., Li, W., Wang, X., Yang, Q., Wang, T., Xu, L., Zhang, M., & Chen, L. (2016). Bioaugmentation and biostimulation of hydrocarbon degradation and the microbial community in a petroleum-contaminated soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 107, 158164. Available from <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.11.019>.
- Youssef N, Simpson DR, McInerney MJ, Duncan KE. 2013. In-situ lipopeptide biosurfactant production by *Bacillus* strains correlates with improved oil recovery in two oil wells approaching their economic limit of production. *Int Biodeterior Biodegrad*. 81(1):127-132. doi: 10.1016/j.ibiod.2012.05.01.
- Yu, W., Lashgari, H., & Sepehrnoori, K. (2014). Simulation study of CO₂ Huff-n-Puff process in Bakken tight oil reservoirs. In Society of petroleum engineers *SPE Western North American and Rocky mountain joint meeting*. Available from <https://doi.org/10.2118/169575-MS>.

CURRICULUM VITAE



Nama : Dea Indriani Astuti
Tempat/tgl lahir : Bandung, 30 April 1970
Kel. Keahlian : Bioteknologi Mikroba
Alamat Kantor : Jl. Ganesha 10 Bandung
Nama Suam : Andrianto Prabowo Rio
Nama Anak : Irshad Adriatama
Rifki Adriarshad

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

No.	Jenjang Pendidikan	Perguruan Tinggi	Tahun lulus	Gelar	Bidang
1.	S1	ITB	1994	S.Si.	Biologi
2.	S3	ITB	2003	Dr.	Biologi

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Nama Jabatan	Tahun
1.	Dosen ITB	1996 - sekarang
2.	Kepala Laboratorium Mikrobiologi, Departmen Biologi, ITB	2003 - 2005
3.	Kepala Laboratorium Bioproses, SITH ITB	2005 - 2010
4.	Ketua Program Studi Mikrobiologi, SITH ITB	2005 - 2011
5.	Ketua Program Studi Rekayasa Hayati, SITH ITB	2011 - 2012
6.	Ketua KK Bioteknologi Mikroba	2011 - 2013
7.	Ketua Divisi Inkubator Industri dan Bisnis LPIK-ITB	2012 - 2013
8.	Sekretaris LPIK-ITB	2013 - 2015
9.	Ketua GKM Prodi Mikrobiologi	2015 - 2017
10.	Koordinator Humas SITH ITB	2015 - 2017
11.	GKM SITH ITB	2018 - 2020
12.	Direktur Kepegawaian ITB	2020 - sekarang
13.	Ketua KK Bioteknologi Mikroba SITH ITB	2023 - sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

No.	Pangkat	Golongan Ruang	TMT
1.	CPNS	III/a	1 Januari 1996
2.	Penata Muda	III/a	1 September 1998
3.	Penata	III/c	1 Oktober 2004
4.	Penata Tk.I	III/d	1 Oktober 2016
5.	Pembina	IV/a	1 Oktober 2018
6.	Pembina Tk.I	IV/b	1 April 2024

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

No.	Jabatan Fungsional	TMT
14.	Asisten Ahli Madya	1 April 2000
15.	Asisten Ahli (inpassing)	1 Januari 2001
16.	Lektor	1 Agustus 2004
17.	Lektor Kepala	18 Mei 2016
18.	Profesor/Guru Besar	1 Agustus 2023

V. KEGIATAN PENELITIAN

No	Tahun	Judul Penelitian	Pendanaan
1	2024	Studi Pembuatan Formulasi Nutrisi untuk Aplikasi MEOR di Sumur Minyak Bumi di Indonesia	PT Pertamina
2	2024	Produksi dan Karakterisasi Biosurfaktan dari Isolat Bakteri Sumur Minyak serta Potensi Penerapannya Sebagai Agen Antimikroba	P2MI ITB
3	2024	Formulasi Krim Tropikal Berbahan Dasar Nanopartikel Rhamnolipid-Ion Logam dan Ektoin sebagai Bahan Aktif Untuk Penyembuhan Luka Bakar Pada Kulit	Riset Dasar
4	2023	Potensi Biosurfaktan dari Isolat Bakteri Kode 16 Sebagai Agen Bioremediasi Tanah Tercemar Logam Berat Timbal (Pb)	P2MI ITB
5	2022	Stabilisasi Isolat Mutan <i>Bacillus</i> Sp. Galur Kg7' Melalui Strategi Adaptive Laboratory Evolution (Ale) Untuk Produksi Biosurfaktan	P2MI ITB
6	2021	Postharvest Processing Standardization of Robusta Coffee Cherry Using Controlled Fermentation	P2MI ITB
7	2020	Eksplorasi dan Pengembangan Bioresource Baru Melalui Analisis Biodiversitas mikroba pada berbagai reservoir Minyak Bumi di Indonesia (Tahun ke-3)	PDUPT DIKTI
8	2020	Apikasi Bakteri Indigen Reservoir Minyak Bumi di Indonesia yang Mampu Memproduksi Polymeric Biosurfactant pada Teknologi Microbial Enhanced Oil Recovery	KLN DIKTI
9	2020	Konversi Asam Lemak Jenuh Stearin Menggunakan Enzim Desaturase	PDUPT DIKTI
10	2019	Eksplorasi dan Pengembangan Bioresource Baru Melalui Analisis Biodiversitas mikroba pada berbagai reservoir Minyak Bumi di Indonesia (Tahun ke-2)	PDUPT DIKTI
11	2019	Potensi Kultur Campuran <i>Bacillus subtilis</i> untuk Diaplikasikan dalam Teknologi MEOR Melalui Simulasi Sand Pack Column	P3MI ITB
12	2018	Karakterisasi Biosurfaktan sebagai Agen Pengontrol MIC (Microbiologically- Influenced Corrosion) pada Pipa Industri Minyak Bumi	PDUPT DIKTI
13	2018	Eksplorasi dan Pengembangan Bioresource Baru Melalui	PDUPT DIKTI

No	Tahun	Judul Penelitian	Pendanaan
		Analisis Biodiversitas mikroba pada berbagai reservoir Minyak Bumi di Indonesia (Tahun ke-1)	
14	2018	Industrialisasi Budidaya Udang Putih Menggunakan Teknologi Hibrid Zero-Water Discharge dan Recirculating Aquaculture System untuk Pengembangan Sustainable Urban Aquaculture di Kab. Gresik (Tahun ke-2)	Rispro LPDP
15	2018	Produksi FEROFFEE "Fermented Coffee" Menggunakan Metode Solid State Fermentation (SSF)	Riset Inovasi ITB
16	2018	Pengembangan Membran Ultrafiltrasi Nanokomposit Antibakterial	Unggulan PT DIKTI
17	2018	Application of Highly Thermostable Biosurfactant of Indigenous Oil Reservoir Bacteria for Microbial Enhanced Oil Recovery (Tahun ke-2)	Kerja sama Luar Negeri DIKTI
18	2017	Industrialisasi Budidaya Udang Putih Menggunakan Teknologi Hibrid Zero-Water Discharge dan Recirculating Aquaculture System untuk Pengembangan Sustainable Urban Aquaculture di Kab. Gresik (Tahun ke-1)	Rispro LPDP
19	2017	Dinamika Perubahan Diversitas Mikroba dan Interaksi Fungsionalnya Selama Fermentasi Kedelai (Glycine Max Mer) dalam Pembuatan Tempe	Program Riset dan Inovasi ITB
20	2017	Eksplorasi Senyawa Bioaktif Dari Ekstrak Kasar Kultur Jamur Endofit Pohon Surian (Toona Sinesis Roem) (Exploration Of Bioactive Compounds From Crude Ekstrakt Of Endophytic fungal Culture Toona Sinesis	Program Riset dan Inovasi ITB
21	2017	Application of Highly Thermostable Biosurfactant of Indigenous Oil Reservoir Bacteria for Microbial Enhanced Oil Recovery (Tahun ke-1)	Kerja sama Luar Negeri DIKTI
22	2017	Field application of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) using Bistimulation approach	Pertamina PEP
23	2017	Produksi Biosurfaktan dari Mikroorganisme ekstremofilik indigen indonesia untuk digunakan dalam MEOR	Unggulan PT DIKTI
24	2016	Produksi Biosurfaktan dari Isolat Bakteri Endogen Reservoir Minyak Bumi sebagai Agen Antibiofilm	Unggulan PT DIKTI
25	2016	Penggunaan poli-hidroksibutirat (PHB) untuk peningkatan pertumbuhan dan ketahanan terhadap infeksi Vibrio campbellii dalam pendederan dan pembesaran kultur udang putih menggunakan teknologi sistem resirkulasi akuakultur (RAS)	Unggulan PT DIKTI
26	2016	Field application of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) using Bioaugmentation approach (Tahun ke-2)	Pertamina PEP
27	2015	Field application of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) using Bioaugmentation approach (Tahun ke-1)	Pertamina PEP
28	2015	Controlling Microbial Induced Corrosion on Pipeline of Oil Industry using Plant Antimicrobial Compound	Unggulan PT DIKTI
29	2014	Pengendalian Gas Rumah Kaca Karbondioksida Menggunakan Fotobioreaktor Mikroalga	Unggulan PT DIKTI

No	Tahun	Judul Penelitian	Pendanaan
30	2014	Pengembangan teknologi ZWD (Zero Water Discharge) dalam budidaya Udang Galah (Tahun ke-1)	Unggulan PT DIKTI
31	2013	Fruit Storage Chamber sebagai alternatif penyimpanan buah pasca panen bagi Indonesia	MP3EI

VI. PUBLIKASI

A. Buku dan Book Chapter

1. Nurrusyda, F.S., **Astuti, D.I.**, Purwasena, I.A., Aditiawati, P., Firdaus, M.I., Husain Akbar Sumeru, H.A., Rahayudin, Y., *Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)*. 2023. PT Dewangga Energi Internasional. ISBN: 978-623-8020-91-1
2. **Astuti, D.I.**, Ariadji, T., Purwasena, I.A., Aditiawati, P., Afinanisa, Q., Abqory, M.H., Erwanto. P.E. 2023. Biostimulation in Microbial Enhanced Oil Recovery: From Laboratory Analysis and Nutrient Formulation to Field Monitoring. In: *Challenges and Recent Advances in Sustainable Oil and Gas Recovery and Transportation*. Editor Joshi,S., Jadhawar P., and Kumar, A. Gulf Professional Publishing, Elsevier. ISBN 978-0-323-99304-3
3. Oktaviani, L., Abduh, M.Y., **Astuti,D.I.**, and Rosmiati, M. 2021. *Solid-State Fermentation of Agro-Industrial Waste Using Heterofermentative Lactic Acid Bacteria*, In: *Multifaceted Protocols in Biotechnology*, Volume 2, Editor International Institute for Halal Research and Training, International Islamic University Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia Azura Amid, Springer, ISBN 978-3-030-75578-2 ISBN 978-3-030-75579-9 (eBook)
4. Suantika, G., Situmorang, M.L., Simatupang, T.M., Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, Miranti, Y.R., Handayani, R., 2020. *Prosedur Operasional Standar Kelembagaan Kelompok Petani Plasma dan Budidaya Urban Farming Udang Putih*. ITB Press.
5. Suantika, G., Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, Situmorang, M.L., Handayani, R. *Panduan Kultivasi Mikroalga untuk Skala Kkecil dan Semimassal*. ITB Press. ISBN: 978-602-0705-09-5
6. Suantika, G., Situmorang, M.L., Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, Azizah, F.F.N., Muhammad, H. 2018. Closed Aquaculture System: Zero Water Discharge for Shrimp and Prawn Farming in Indonesia. In. *Biological Resources of Water*. Ed. Sajal Ray. ISBN 978-1-78923-081-9

B. Jurnal

1. Purwasena, I.A., Amaniyah. M., **Astuti, D.I.**, Firmansyah Y., and Sugai, Y., 2024. Production, characterization, and application of *Pseudoxanthomonas taiwanensis* biosurfactant: a green chemical for microbial enhanced oil recovery (MEOR). *Scientific Reports*, Vol 14, Article number: 10270
2. Helmi, H., **Astuti, D.I.**, and Aditiawati, P. 2024. Bacterial diversity and community level physiological profiling of terasi (Indonesian shrimp paste) to ensure its food safety. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1302 012096
3. Habibah, F.F., Rizki, W.O.S., Ivansyah, A.L., **Astuti, D.I.**, Hertadi, R. 2024. Green synthesis of copper ions nanoparticles functionalized with rhamnolipid as potential antibacterial agent for pathogenic bacteria. *Heliyon* 10(1): e24242.
4. Yarlina, V.P., **Astuti D.I.**, Djali M., Andoyo R., Lani, M.N. 2023. Effects of Combined Pure Cultures of *Rhizopus* sp. (*Rhizopus oryzae*, *Rhizopus oligosporus* and *Rhizopus stolonifer*) on Tempeh Extract Yogurt as a Functional Food. *Current Nutrition and Food Science*, Vol 19, Issue 3, pages 307-316
5. Prativi, M.B.N., Astuti D.I., Putri, S.P., Lavina, W.A., Fukusaki, E. , Aditiawati, P. 2023. Metabolite Changes in Indonesian Tempe Production from Raw Soybeans to Over-Fermented Tempe. *Metabolites*, Vol 13, Issue 2, pages 300.
6. Sato A., Putri, S.P., **Astuti, D.I.**, Fukusaki E. 2022. Metabolome analysis to investigate the effect of controlled fermentation on taste-related metabolites in terasi. *Metabolomics*, Vol 18, Issue 7 Pages 44.
7. **Astuti, D.I.**, Purwasena, I.A., Priharto, N., Ariadji, T., Afifah, L.N., Saputro, R.B., Aditiawati, P., Persada, G.P., Ananggadipa, A.A., Abqory, M.H., Amaniyah, M., and Dewi, U.R. 2022. Bacterial Community Dynamics during MEOR Biostimulation of an Oil Reservoir in Sumatra Indonesia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol 208 Part D.
8. **Astuti, D.I.**, Rahmatunisa, N., Kamarisima, , Nugroho, G.G.S., Suhardi, V.S.H., and Taufik. I. 2022. Enhancement of Biosurfactant Production by Bacteria Isolated from Crude Oil through Adaptation Laboratory Evolution. *Geomicrobiology Journal*, Vol 40, Issue 2

9. Helmi, H., **Astuti, D.I.**, Putri, S.P., Sato, A., Lavina, W.A., Fukusaki, E., and Aditiawati, P. 2022. Dynamic Changes in the Bacterial Community and Metabolic Profile during Fermentation of Low-Salt Shrimp Paste (Terasi). *Metabolites*, 12(2), 118
10. Pikoli, M.R., Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, Akhmaloka, A. 2022. The Alternating Growth of Bacteria within a Consortium During Desulfurization of Coal. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(1): 51-60
11. Monconegoro, D.A., **Astuti, D.I.**, and Priharto, N. 2022. Optimization of Bacillus paramycooides Fermentation Medium To Increase The Production of 5-Aminolevulinic Acid in a 10 Liter Fermenter. *Jurnal Bioteknologi dan Biosains Indonesia*, Vol 9(2), 195-207
12. **Astuti, D.I.**, Purwasena, I, Prihatro, N., Ariadji, T., Afifah, L.N., Saputro, R.B., Aditiawati, P., Persada, G.P., Ananggadipa, A.A., Abqory, M.H., Amaniyah, M., Dewi, U.R., 2022. Bacterial community dynamics during MEOR biostimulation of an oil reservoir in Sumatera, Indonesia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 208, Part D, 109558
13. Nandyawati, D., **Astuti, D.I.**, Nurhayati, N., Riswoko, A., and Helianti, I. 2021. Production and Characterization of Thermoalkaliphilic Xylanase from Bacillus halodurans CM1, and Its Application on Degumming Process of Ramie (L.Gaud) Fiber as Textile Raw Material Boehmeria nivea). *Microbiology Indonesia*, 15 (3), 91-101
14. Afianti, N.F. and **Astuti, D.I.** 2021. Pengaruh Nitrat terhadap Biokorosi Logam oleh Konsorsium Bakteri Pereduksi Sulfat dari PLTA Saguling. *Oldi (Oceanologi dan limnologi di Indonesia)*, 6(2), 71-84
15. Yarlina, V. P., dan **Astuti, D. I.** 2021. Karakterisasi kandungan vitamin B12, folat dan isoflavon tempe kedelai dengan isolat murni Rhizopus oryzae, Rhizopus oligosporus, dan Rhizopus stolonifer sebagai bahan pangan fungsional. *Teknologi Pangan : Media Informasi Dan Komunikasi Ilmiah Teknologi Pertanian*, 12(1), 92-102.
16. Purwasena, I.A., **Astuti, D.I.**, Rusiwardani, N.S. 2021. Screening and Optimization of Carbon Source to Increase High Thermostabile

- Biosurfactant Production for Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) Application. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1772 012033.
17. Setyaningrum, S., Priharto, N., **Astuti, D.I.**, dan Ananggadipa, A.A. 2021. Bacterial Core Flooding terhadap Limestone Artificial Core sebagai Aplikasi Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR). *Jurnal Petro*, Vol 10(5), 197-205. ISSN: 26147297.
 18. **Astuti, D.I.**, Purwasena, I.A., Satrio, G.G., Andika, K.R., Millati, G.Z., Dwiningrum, T.W., and Meriani, E. 2020. Optimization of Enrichment and Isolation Media of Thermophilic Hydrocarbonoclastic Bacteria Isolated from Oil Reservoir of West Java for Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) Application. *Sains Malaysiana* 49(9)(2020): 2129-2139.
 19. Purwasena, I.A., **Astuti, D.I.** and Utami, S.G. 2020. Nitrogen Optimization on Rhamnolipid Biosurfactant Production from *Pseudoxanthomonas* sp. G3 and Its Preservation Techniques. *Sains Malaysiana* 49(9): 2119-2127.
 20. Mahulette, F. and **Astuti, D.I.** 2020. The optimization of the Ambonese arrack fermentation using co-culture *Pichia polymorpha* and *Kloeckera javanica*. *BIODIVERSITAS*, Volume 21, Number 7, Pages: 2900-2906.
 21. Purwasena, IA., **Astuti, D.I.**, Taufik,I., and Putri, F.Z. 2020. The Potential of Clove Essential Oil Microemulsion as an Alternative Biocide Against *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm. *J. Pure Appl. Microbiol.*, 14(1), 261-269
 22. Sato, A., **Astuti, D.I.**, Putri, S.P., and Fukusaki, E. 2020. Quality Improvement of Semi-Wet Terasi by Optimizing the Starter Culture Ratio of Controlled Fermentation. *Hayati Journal of Biosciences*. Vol. 27 No. 4, October 2020 320-329
 23. Mahulette, F. and **Astuti, D.I.** 2020. Microbial Succession and Chemical Characteristics in Fermentation of Ambonese arrack (Sopi), Traditional Beverage from Maluku. *Biosaintifika* 12 (2) (2020): 147-154
 24. Wenten, I.G., Khoiruddin, K., Wardani, A.K., Aryanti, P.T.P., **Astuti, D.I.**, Komaladewi, A.A.I.A.S. 2020. Preparation of antifouling polypropylene/ZnO composite hollow fiber membrane by dip-coating method for peat water treatment. *Journal of Water Process Engineering*. Volume 34, pp 1-29

25. Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, Kriswantoro, J.A., Khanza, S.M, Kamarisima, Irifune, T., Fukusaki, E., Putri, S.P. 2020. GC/MS-based metabolic profiling for the evaluation of solid state fermentation to improve quality of Arabica coffee beans. *Metabolomics* 16:57
26. Handaruni, R., Astuti, D.I., Purwasena, I.A., and Afifah, L.N. 2020. Indigenous Microbial Biostimulation for Microbial Enhanced Oil Recovery through Oil Degradation with Variation in Nutrien Concentrations. *Makara Journal of Science*, 24(2), Article 2, E-ISSN: 2356-0851, ISSN: 2339-1995
27. Purwasena, I.A., **Astuti, D.I.**, Syukron, M., Amaniyah, M., Sugai, Y. 2019. Stability test of biosurfactant produced by *Bacillus licheniformis* DS1 using experimental design and its application for MEOR. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 183, 106383
28. **Astuti, D.I.**, Purwasena, I.A., Putri, R.E., Amaniyah, M., Sugai, Y. 2019. Screening and characterization of biosurfactant produced by *Pseudoxanthomonas* sp. G3 and its applicability for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 9(3), pp. 2279-2289
29. Tangapo, A.M., **Astuti, D.I.**, Aditiawati, P. 2018. Dynamics and diversity of cultivable rhizospheric and endophytic bacteria during the growth stages of cilembu sweet potato (*Ipomoea batatas* L. var. cilembu). *Agriculture and Natural Resources* 52(4), pp. 309-316
30. Suantika, G., Situmorang, M.L., Kurniawan, J.B., Pratiwi, S.A., Aditiawati, P., **Astuti, D.I.** Azizah, F.F.N., Djohan Y.A., Zuhri, U., Simatupang, T.M. 2018. Development of a zero water discharge (ZWD)—Recirculating aquaculture system (RAS) hybrid system for super intensive white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) culture under low salinity conditions and its industrial trial in commercial shrimp urban farming in Gresik, East Java, Indonesia. *Aquacultural Engineering*, 82, 12-24
31. **Astuti, D.I.** Purwasena, I.A., Putri, F.Z. 2018. Potential of biosurfactant as an alternative biocide to control biofilm associated biocorrotion. *J. Environ. Sci. Technol.* 11(2), 104-111
32. **Astuti, D.I.**, Taufik, I., Achnafani, D., and Priscila, E.S. 2018. Physiological Profiling and Microorganism Community Analysis of Cirebon Shrimp Paste Fermentation “Terasi” using BIOLOGTM EcoPlate. *Microbiology Indonesia*. Vol 12 (1), 15-22

33. Taufik, I., **Astuti, D.I.**, Purwasena, I.A., Rodiana, W.N. 2018. Effect of Lemongrass (*Cymbopogon citratus*) Essential Oil on Biofilm-biocorrosion in Formation Water Environment. *Asian. Journal of Scientific Research*. Volume 11 (3): 329-336, 2018
34. Suantika, G., Putri, A.D., Djohan, Y.A., Nur Azizah, F.F., **Astuti, D.I.**, and Aditiawati, P. 2017. Impact of Salinity and Light Intensity Stress on B Vitamins Content in Marine Diatom *Skeletonema costatum*. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 12: 22-28
35. **Astuti, D.I.**, Purwasena, I.A., Aditiawati, P., Sani, I., Ariadji, T., and Abqory, M.H.. 2017. Potential Degradation of SARA (Saturated, Aromatics, Resinics, Asphaltenes) Fractions of Crude Oil by Reservoir Indigenous Bacteria from South Sumatera. *Microbiology Indonesia*, 11(4), 137-146.
36. Rosada, K.K., Najia, N., Ningrum, R.W., **Astuti, D.I.**, Suantika, G., and Aditiawati, P. 2017. The Ability of Biofilm Community Sampled from Metal Surfaces at Saguling Hydro Power in Utilizing Carbon Sources by Using Biolog EcoPlate™. *Journal of Biological Sciences*, 17(1), 11-20
37. Suantika, G., Putri, A.D., Djohan, Y.A., Nur Azizah, F.F., **Astuti, D.I.**, and Aditiawati, P. 2017. Impact of Salinity and Light Intensity Stress on B Vitamins Content in Marine Diatom *Skeletonema costatum*. *Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 12: 22-28.
38. Suantika, G., Muhammad, H., Nur Azizah, F.F., Rachminiwati, N., Situmorang, M.L., **Astuti, D.I.**, Aditiawati, P., 2016. The Use of Cyanobacteria *Arthrospira platensis* and Cladoceran *Daphnia magna* as Complementary Protein and Lipid Sources in Transitional Diet for Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) Nursery. *Natural Resources*, 7, 423-433.
39. Suantika, G., Pratiwi, M.I., Situmorang, M.L., Djohan, Y.A., Muhammad, A., **Astuti, D.I.** Ammonium Removal by Nitrifying Bacteria Biofilm on Limestone and Bioball Substrate Established in Freshwater Tricking Biofilter. *Poultry, Fishery & Wildlife Science*, Volume 4, Issue 2, Artikel 1000157
40. Rahmawati, N., Isfandito, A.R., **Astuti, D.I.**, and Aditiawati, P. 2016. Endophytic Fungi from Surian (*Toona sinensis* Roem) and Antioxidant Potency from its Culture. *Asian Journal of Plant Sciences*; 15(1/2) : 8-15

41. Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, Suantika, G., Simatupang, T.M. 2016. Pengembangan Potensi Lokal di Desa Panawangan sebagai Model Desa Vokasi dalam Pemberdayaan Masyarakat dan Peningkatan Ketahanan Pangan Nasional. *Jurnal Sositologi*, 15(1), 59-67
42. Fulazzaky, M., **Astuti, D.I.**, and Fulazzaky, M.A. 2015. Laboratory simulation of microbial enhanced oil recovery using *Geobacillus toebii* R-32639 isolated from the Handil reservoir. *RSC (Royal Chemical Society) Advances*, 5(5): 3908-3916
43. Rinanti, A., Kardena, E., **Astuti, D.I.**, and Dewi, K. 2015. Preliminary Study on Climate Change Biomitigation by Improving CO₂ Removal and CO₂ Utilization Efficiency Using Microalgae Culture in Photobioreactor. *Applied Mechanics and Materials*, 747 (261-264)
44. Rinanti, A, Dewi, K., Kardena, E., and **Astuti, D.I.** 2014. Biotechnology Carbon Capture and Storage (CCS) by mix-culture Green Microalgae to Enhancing Carbon Uptake Rate and Carbon Dioxide Removal Efficiency with Variation Aeration Rates in Closed System Photobioreactor . *Jurnal Teknologi*, 69 (6) 105-109
45. Rinanti, A., Kardena, E., **Astuti, D.I.**, and Dewi, K. 2014. Improvement of carbon dioxide removal through artificial light intensity and temperature by constructed green microalgae consortium in a vertical bubble column photobioreactor. *Malaysian Journal of Microbiology*, 10(1), 29-37. ISSN (print) 1823 8262 ISSN (online): 2231-7538
46. Rinanti, A., Dewi, K., **Astuti, D.I.**, and Halomoan, N. 2014. Preliminary study on biomitigation greenhouse gas carbon dioxide in closed system bubble photobioreactor: Relationship among the mass transfer rate and CO₂ removal efficiency in high level of CO₂. *Jurnal Teknologi* 69:6 (2014) 93–99
47. Pikoli, M.R., Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, Akhmaloka. 2013. Bacterial diversity in subituminous coal and soil from coal mine of South Sumatera. *International Journal of Integrative Biology* Vol. 14 No. 2, 96-101. ISSN (online): 0973-8363 ISSN (print): 0974-2816.
48. Suantika, G. Aditiawati, P., **Astuti, D.I.** and Khotimah, Z.F. 2013. The use of Indigenous Probiotic *Halomonas aquamarina* and *Shewanella algae* for White Shrimp (*Litopenaeus vannamei* Bonne) Hatchery Productivity in Zero Water Discharge System. *Journal of Aquaculture*

Research and Development. 4(5), doi: 10.4172/2155-9546.1000194. ISSN 2155-9546.

49. **Astuti, D.I** and Noviana, Z. 2013. Optimization of fermented tofu with high isoflavone content through variation of inoculum percentages and ratios of *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus acidophilus*, and *Leuconostoc mesenteroides*. *Journal of Mathematics and Fundamental Science*. 45 (3), 263-273. Print ISSN: 2337-5760. E-ISSN: 2238-5510
50. Rinanti, A., Kardena, E., **Astuti, D.I.**, and Dewi, K. 2013. Growth response and chlorophyll content of *Scenedesmus obliquus* cultivated in different artificial media. *Asian Journal of Environmental Biology*, 1(1), 1-9.
51. Pikoli, M.R., Aditiawati, P., Akhmaloka, and **Astuti, D.I.** 2013. DNA Extraction of Mixed Culture Bacteria from Coal-Soil Mixture Cultured by Sequential Enrichment. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 7(3), 1737-1742. ISSN 0973-7510.
52. Rinanti, A., Kardena, E., **Astuti, D.I.**, and Dewi, K. 2013. Integrated vertical photobioreactor system for carbon dioxide removal using phototrophic microalgae. *Nigerian Journal of Technology*, 32(2): 225-232. ISSN 1115-8443.
53. Rinanti, A., Kardena, E., **Astuti, D.I.**, and Dewi, K. 2013. Screening of potential photosynthetic microalgae from wastewater treatment plant for Carbon dioxide Capture and Storage (CCS). *Asian Transactions on Science and Technology*, 3(1): 1-8. ISSN 2221-4283.
54. Aditiawati, P., Akhmaloka, **Astuti, D.I.**, Sugilubin, and Pikoli, M.R. 2013. Biodesulfurization of Subbituminous Coal by Mixed Culture Bacteria Isolated from Coal Mine Soil of South Sumatera. *Biotechnology*, 12(1): 46-53. E ISSN 1662-2978 P ISSN 1682-296X
55. Munawar, P. Aditiawati, dan **D.I. Astuti**. 2012. Sequential Isolation of Saturated, Aromatic, Resinic, and Asphaltic Fraction Degrading Bacteria from Oil Contaminated Soil in South Sumatra. *Journal Makara Seri Sains*, 16 (1), ISSN 1693-6671.
56. Suantika, G., **Astuti, D.I.**, Arief, R.R., Rusni, M., Turendro, OR. 2012. The Use of Zero Water Discharge Technology through Application of Nitrifying Bacteria and Textile Vertical Substrate For Grow out Phase of *Macrobrachium rosenbergii* de Man. *Journal of Aquaculture Research and Development*, Vol 3 Issue 5. ISSN 2155-9546

57. Saepudin, **Astuti, D.I.** 2012. Pengembangan Model Penerimaan Biopestisida (Studi Kasus Petani Sayuran di Desa Cipada Kecamatan Cisarua Kabupaten Bandung Barat). *Jurnal Sositologi*, 27(11), 178-193
58. Aditiawati, P., Sugoro, I., **Astuti, D.I.**, Sasongko, D. Biosolubilisasi Hasil Iradiasi Gamma oleh Kapang *Tricoderma* sp. 2011. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*. Vol 7 No. 1. Hal 11-20. Juni 2011. ISSN 1907-022.
59. Suantika, G., Adityawati, P., **Astuti, D.I.**, Yusuf, S. 2009. Pengaruh Kepadatan Awal Inokulum terhadap Kualitas Kultur *Chaetoceros gracilis* (Schutt) pada Sistem Batch. *Jurnal Matematika dan Sains*, 14(1): 1-8

C. Seminar

1. Maspudin, K., Purwasena, I.A., **Astuti, D.I.**, and Suherman, D. 2023. Screening of Biosurfactant Producing Bacteria for Potential Application in Pb Heavy Metal Remediation. 2023. *International Symposium on Earth Science and Technology*, Kyusu University, November 2023.
2. Purwasena, I.A., **Astuti, D.I.**, Intan, T., Lani, D., Rodiana, W.N. 2019. Effects of nutrient composition on the formation of biofilm and biocorrosion in MEOR biostimulation medium based on response surface methodology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 299(1),01201
3. Hosiana, N., **Astuti, D.I.**, and Suroño I.S. 2019. Physio-chemical, Microbiology, and Preference of Probiotic Fresh Soft Cheese Using *Lactobacillus plantarum* IS-10506 and *Streptococcus thermophilus* as Mixed Starter Culture. *The 3rd International Conference on Eco Engineering Development* 13–14 November 2019, Solo, Indonesia, Published under licence by IOP Publishing Ltd IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 426. (012185).
4. Ariadji, T., **Astuti, D.I.**, Priharto, N., Ananggadipa, A.A., Persada, G.P., Subiantoro, E. 2019. Field Implementation of nutrient huff and puff in Bantayan Field, South Sumatera: Towards A Los Cist EOR. 2019. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, 29-31 Oct 2019, Nusa Dua Convention Center, Bali, Indonesia.

5. Purwasena, I.A., **D.I Astuti**, R. Fatmawati, and Q. Afinanisa. 2018. Isolation and Characterization of Oil Degrading Bacteria from One of South Sumatera's Oilfield. *IOP Conference Series: material science and engineering, from The 2nd Annual Applied Science and Engineering Conference (AASEC 2017)*, 24 August 2017, Bandung, Indonesia
6. **Astuti, D.I**, T. Ariadji, P. Aditiawati, I.A. Purwasena, G.P.Persada, A. A. Ananggadipa, U.R. Dewi, D.D. Khendarsyah, R. Rizki, M.H. Abqory, and R.N. Ardianto. 2017. A Comprehensive Preparation Study for Microbial Nutrient Injection of Microbial Enhanced Oil Recovery: Reservoir Screening and Laboratory Analysis – Case Study Bentayan Field. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, 17-19 October 2017, Jakarta, Indonesia
7. Ariadji, T. **D.I Astuti**, P. Aditiawati, I.A. Purwasena, G.P.Persada, M.R. Soepomo, N.H. Amirudin, A.A. Ananggadipa, S.Y. Sasongko, M.H. Abqory, R.N. Ardianto, E. Subiantoro, G.H. Aditya. 2017. Microbial Huff and Puff Project at Mangunjaya Field Wells: The First in Indonesia towards successful MEOR Implementation. *SPE/IATMI Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, 17-19 October 2017, Jakarta, Indonesia.
8. Purwasena, I. A., **Astuti, D.,I.**, Fauziyyah, N.A., Putri, D.A.S., Fauzan, M., Putri, F.Z. 2017, Antimicrobial Biosurfactant Produced by Endogenous Oil Reservoir Bacteria and Its Potential to Eradicate Biofilm as Biocorrosion Agent in Oil Industry. *Proceeding Indonesian Petroleum Association, Forty-First Annual Convention & Exhibition*, May 2017, Jakarta, Indonesia
9. Rozana, K., **D.I. Astuti**, and I.A. Purwasena. 2017. The effect of temperature variations, oil concentration, and types of oils to the biosurfactant production by *Bacillus subtilis* F1. *International Symposium on Earth Science and Technology, Kyushu University, Japan*
10. Amaniyah, M., **D.I. Astuti**, and I.A. Purwasena. 2017. Experimental Study of Biosurfactant Produced by Microorganism Isolated from Oil Reservoir for Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) Using Sand-Pack Column. *International Symposium on Earth Science and Technology, Kyushu University, Japan*
11. Purwasena, I. A., **Astuti, D. I.**, dan Putri, F. Z. 2017. Penapisan Biosurfaktan dari Isolat Bakteri Indigen Reservoir Minyak Bumi

- yang Memiliki Aktivitas Antimikroba. *Seminar Nasional Ilmu Pengetahuan, Teknologi, dan Seni*.
12. **Astuti, D.I.**, Purwasena, I.A., Taufik, I., Diana, L., Rodiana, W.N. 2016. Analyzing effects of DAP, NPK, and molasses towards biofilm formation in MEOR biostimulation media using response surface methodology. *Proceeding of Asean Microbial Biotechnology Conference*, Agustus 2016, Bali, Indonesia
 13. **Astuti, D.I.**, and A.N. Ardea. 2012. Optimization of Kojic Acid Production as an anti-aging compound using variations of carbon sources by *Aspergillus oryzae*. *Proceeding of International Conference on Women's Health in Science and Engineering (WiSE-HEALTH 2012)*. Bandung, Indonesia. ISBN 978-602-17250-0-9.
 14. **Astuti, D.I.**, and Y.D Utami. 2012. Effect of grape (*Vitis vinifera*) skin crude extract intake to *Pichia vini* growth on fedbatch fermentation. *Proceeding of International Conference on Women's Health in Science and Engineering (WiSE-HEALTH 2012)*. Bandung, Indonesia. ISBN 978-602-17250-0-9. *Prosiding Seminar Nasional MIPA Universitas Nusa Bangsa*. ISBN 978-602-17336-0-8
 15. Sugoro I., **D.I. Astuti**, D. Sasongko, P. Aditiawati. 2012. Seleksi Fungi Hasil Isolasi dari Area Pertambangan Batubara di Lahat dan Tanjung Enim, Sumatera Selatan, sebagai Agen Biosolubilisasi.
 16. Munawar, Aditiawati, P., **Astuti, D.I.** 2011. Biodegradasi Fraksi Asfalten oleh Bakteri yang Diisolasi dari Tanah Terkontaminasi Minyak Bumi di Provinsi Sumatera Selatan. *Prosiding Seminar Nasional AVoER ke-3*. Universitas Sriwijaya Palembang, 26-27 Oktober 2011. ISBN 979-587-395-4.
 17. Suantika, G., Aditiawati, P., **D.I. Astuti**, Anggraeni, J., Khoirunnas, RF., Williantara, I., Sugata, M. 2010. Identification and Optimization of Indigenous Probiotic Bacteria Against *Vibrio harveyi* Isolated from Hatchery of *Litopenaneus vannamei* Culture in Situbondo, East Java. *The 3rd International Conference on Mathematics and Natural Sciences*. Bandung, Indonesia. ISBN 978-979-17090-3-3
 18. Halim, A.Y., **Astuti, D.I.**, Juli, N., and Siregar, S. 2009. Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR): Laboratory Study of Exogenous Bacteria Ability to Attack Crude Oil Hydrocarbon and Change Crude Oil Physical Characteristics. *The 2nd International Symposium of Novel Carbon* University- ITB, Bandung, Indonesia

19. Agustina, A., and **Astuti, D.I.** 2009. Optimization of inoculum amount on mix culture from isolated bacteria in Suratmi Well-Seribu Island and its effects to crude oil characterization. *International Conference and Exhibition on Science and Technology in Biomass Production 2009*. Bandung, Indonesia. ISBN 978-602-96488-0-5.
20. **Astuti, D.I.**, Aditiawati, P., Munawar, Wiryoatmojo, A.S., and Herfini, R. 2009. The Potency of Petrophilic indigenous microorganisms as bio-agent for bioremediation of contaminatee sites by petroleum hydrocarbon. *International Conference and Exhibition on Science and Technology in Biomass Production 2009*. Bandung, Indonesia. ISBN 978-602-96488-0-5
21. Suantika, G., Aditiawati, P., **Astuti, D.I.**, and Perangin angin K. 2008. Isolation and Application of Potential Probiotic Bacteria Against *Aeromonas hydrophila* in Larvae Culture of Pangasid Catfish *Pangasius sutchi* Fowler. International Symposium on Catfish Farming in Asia, Vietnam, Dec 2008
22. Fitriyanti, M. and **Astuti, D.I.** 2008. The Making of Heat Killed Vaccine of *Aeromonas hydrophila* and Determining Its Effect on Immunity of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus* with Immersion Method. Proceeding 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, Indonesia
23. Dwiranti, A. and **Astuti, D.I.** 2008. Vaccine Production from *Aeromonas hydrophila* with the Addition of 3% Formalin and Determination of Vaccine Concentration to Increase Specific Immunity of Indigo Fish (*Oreochromis niloticus*) Using Submerssion Vaccination Method. Proceeding 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, Indonesia
24. Primeia, S., **Astuti, D.I.**, and Juli, N. 2008. Nitrogen Source Optimization for Biosurfactant Production by Hydrocarbonoclastic Bacteria from East Kalimantan for MEOR Application. Proceeding 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, Indonesia
25. Halim, A.Y., **Astuti, D.I.**, Juli, N., Siregar, S., Solihah, E. 2008. Laboratory Study of Bacteria from an Oil Reservoir in Kalimantan to be applied as indigenous and non-indigenous bacteria in Microbial Enhanced Oil Recovery. Proceeding 2nd International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, Indonesia

26. Halim, A.Y., Juli, N., **Astuti, D.I.**, and Siregar, S. 2008. The EOR Impact of Bacteria from Handil Field in Kalimantan on crude oil from X Reservoir in Java Island. Proceeding Indonesian Petroleum Association, 32nd Annual Convention and Exhibition, Jakarta, Indonesia.
27. Novilla, A., Aryantha, N.P., and **Astuti, D.I.** 2006. The lactic acid bacteria as biocontrol agent against *Salmonella typhii* (Le Minor and Popov). Proceeding International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, Indonesia
28. Satitiningrum, Y., Juli, N., and **Astuti, D.I.** 2006. Isolation and Identification of Indigenous Microbes from Oily Cutting and Sludge. Proceeding International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, Indonesia
29. Satitiningrum, Y., **Astuti, D.I.**, and Juli, N. 2006. Optimization of C:N:P and inoculum ratio for Bioremediation Process of Petroleum Hydrocarbon Wastes Using Indigenous Microbes. Proceeding International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS), Bandung, Indonesia

VII. PATEN

No.	Karya Paten	Keterangan
1.	Bakteri <i>Pseudomonas taiwanensis</i> G3 dan sediaan bahan biosurfaktan dari bakteri tersebut untuk aplikasi Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) serta proses produksinya	Paten tersertifikat (Sertifikat No IDP000084090)
2.	Bakteri <i>Bacillus</i> sp. Strain FN dan Sediaan Biosurfaktan yang Dihasilkannya Sebagai Anti-Adhesi, Anti-Biofilm, Agen Emulsifikasi dan Penurunan Tegangan Antarmuka Minyak-Air Serta Proses Produksinya	Paten tersertifikat (Sertifikat No IDP000084531)
3.	Bakteri <i>Bacillus lichenifonais</i> DS1 dan Sediaan Biosurfaktan serta Biopolimer dari Bakteri Tersebut Untuk <i>Microbial Enhanced Oil Recovery</i> (MEOR) serta Proses Produksinya	Paten tersertifikat (Sertifikat No IDP000089820)
4.	Proses Pembuatan Kopi Beras (<i>Green Bean</i>) Terfermentasi Menggunakan Bakteri Proteolitik, Pektinolitik, Amilolitik dan Selulolitik untuk Menghasilkan Kopi dengan Penilaian Cita Rasa yang Tinggi dan Konsisten	Paten tersertifikat (Sertifikat No IDP000090882)

No.	Karya Paten	Keterangan
5.	Biosurfaktan dari <i>Bacillus licheniformis</i> DS1 dan Biosurfaktan dari <i>Pseudoxanthomonas taiwanensis</i> G3 Sebagai Agen Anti-Biofilm untuk Mengatasi Biokorosi pada Logam Baja ST-37	Paten terdaftar
6.	Metode Fermentasi Kopi Wine Arabika Terkontrol Menggunakan Isolat Bakteri dan Ragi untuk Menghasilkan Kopi dengan Penilaian Cita Rasa Tinggi dan Konsisten	Paten terdaftar
7.	Material Biofilter Poliuretan Modifikasi untuk Budidaya Perikanan dalam Sistem Tertutup Hibrid Resirkulasi Tanpa Buangan Air serta Metode Produksinya	Paten terdaftar

VIII. PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalencana Karya Satya X tahun	Presiden RI	2009
2.	Penghargaan ITB bidang Inovasi	Rektor ITB	2016
3.	Satyalencana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	2018
4.	Penghargaan Pengabdian 25 Tahun ITB	Rektor ITB	2021



📍 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 978-623-297-503-3

