



TUGAS AKHIR - TF 181801

OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOPOLIMER *MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY*

EKA WAHYU PRASOJO
NRP 0231 17 45000 052

Dosen Pembimbing
Hendra Cordova, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - TF 181801

***OPTIMIZATION OF OPERATING CONDITION
BIOPOLYMER MICROBIAL ENHANCED OIL
RECOVERY***

EKA WAHYU PRASOJO
NRP 0231 17 45000 040

Supervisor
Hendra Cordova, ST., MT.

*DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019*

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Eka Wahyu Prasajo

NRP : 02311745000052

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul “Optimisasi Kondisi Operasi Biopolimer *Microbial Enhanced Oil Recovery*” adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 25 Juli 2019

Yang membuat pernyataan,



Eka Wahyu Prasajo

**LEMBAR PENGESAHAN
OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOPOLIMER
MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY**

TUGAS AKHIR

Oleh :

Eka Wahyu Prasajo
NRP : 0231 17 45000 052

Surabaya, 25 Juli 2019
Mengetahui

Dosen Pembimbing



Hendra Cordova, ST., MT.
NIPN. 19690530 199412 1 001

Menyetujui,

Kepala Departemen Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN
OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOPOLIMER
MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY





TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Eka Wahyu Prasajo
NRP. 0231 17 45000 052

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Hendra Cordova, S.T., M.T  (Pembimbing)
2. Ir. Matradji, M.S  (Ketua Penguji)
3. Dyah Sawitri, S.T., M.T  (Penguji 1)
4. Iwan Cony Setiadi, S.T., M.T  (Penguji 2)

SURABAYA
JULI, 2019

OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOPOLIMER *MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY*

Nama Mahasiswa : Eka Wahyu Prasajo
NRP : 0231 17 45000 052
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Hendra Cordova S.T.,M.T

ABSTRAK

Salah satu cara dalam mengeksplorasi minyak menggunakan *EOR* yang saat ini dikembangkan yaitu menggunakan *biothechnological* yang biasa dikenal dengan *Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)*. Pada *MEOR* bakteri mengalami beberapa tahap siklus hidup dan fase eksponensial merupakan fase terpenting dalam memproduksi biopolimer sehingga dibutuhkan model kondisi operasi terbaik pada variabel desain yaitu laju aliran massa, tekanan, temperatur, konsentrasi bakteri dan konsentrasi nutrisi injeksi yang mampu memberikan hasil terbaik dalam memproduksi minyak. Begg's-Brill digunakan untuk memodelkan *pressure drop* pada *injection well* dan *production well* yang menunjukkan rata-rata error 0.383% dan rata-rata error 2.437% untuk temperatur jika dibandingkan dengan *software* PIPESIM. Pada *reservoir* dengan menggunakan persamaan darcy didapatkan rata-rata error 0.782% untuk tekanan dan rata-rata error 0.115% untuk temperatur jika dibandingkan dengan *software* COMSOL *Multiphysics*. Berdasarkan hasil optimisasi menggunakan *Stochastic Algorithms* yang terdiri dari 2 jenis teknik optimisasi yaitu *Duelist Algorithm (DA)* dan *Genetic Algorithm (GA)* diperoleh hasil terbaik dari *Genetic Algorithm* dengan mengoptimalkan kondisi operasi hingga 88.6% dimana profit dapat dioptimisasi dari 23330.467 USD/hari menjadi 43998.396 USD/hari.

Kata Kunci : Biopolimer, Begg's-Brill, Darcy, *Stochastic Algorithms*

**OPTIMIZATION OF OPERATING CONDITION
BIOPOLYMER MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY**

Name : Eka Wahyu Prasajo
NRP : 0231 17 45000 052
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor : Hendra Cordova S.T.,M.T

ABSTRACT

One way to explore oil using EOR is currently being developed, namely using biotechnological, commonly known as Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR). In MEOR the bacteria undergo several life cycle stages and the exponential phase is the most important phase in producing biopolymer so that the best operating conditions model is needed on design variables, namely mass flow rate, pressure, temperature, bacterial concentration and concentration of injection nutrients that can provide the best results in producing oil. Begg's-Brill is used to model pressure drop on injection well and production well which shows an average error of 0.383% and an average error of 2.437% for temperature when compared with PIPESIM software. In the reservoir using the darcy equation an average error of 0.115% was obtained for pressure and an average error of 0.782% for temperature when compared with COMSOL Multiphysics software. Based on the results of the optimization using Stochastic Algorithms which consists of two types of optimization techniques, namely Duelist Algorithm (DA) and Genetic Algorithm (GA), the best results from Genetic Algorithm are optimized by 88.6s% where the profit can be optimized from 23330.467 USD to 43998.396 USD /day.

Keywords : Biopolymer, Begg's-Brill, Darcy, Stochastic Algorithms

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

“OPTIMISASI KONDISI OPERASI BIOPOLIMER *MICROBIAL ENHANCED OIL RECOVERY*”

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Hendra Cordova S.T.,M.T selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, yang selalu memberikan bimbingan dan semangat pada penulis.
2. Agus M. Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua Departemen Teknik Fisika - ITS.
3. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika - ITS.
4. Thukul Prasajo dan Yateni selaku orang tua penulis serta segenap keluarga besar penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan untuk penulis.
5. Teman-teman Departemen Teknik Fisika – ITS dan teman-teman seperjuangan TA yang senantiasa memberikan motivasi dan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 25 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Lingkup Kajian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Enhanced Oil Recovery (EOR)</i>	5
2.2 <i>Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)</i>	6
2.3 Biopolimer <i>MEOR</i>	7
2.4 Permodelan Monod biopolimer	8
2.5 Permodelan Metode Begg's-Brill	11
2.6 Permeabilitas	15
2.7 <i>Reynold Number</i>	16
2.8 Hukum Darcy	17
2.9 Porositas	18
2.10 Permodelan Transfer Panas pada <i>Injection</i> atau <i>Production Well</i>	19
2.11 Permodelan Transfer Panas pada <i>Reservoir</i>	19
2.12 <i>Genetic Algorithm</i>	21
2.13 <i>Duelist Algorithm</i>	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Penentuan Input Produksi Biopolimer <i>MEOR</i> dan <i>Reservoir Formation Properties</i>	30

3.2	Formulasi permasalahan	30
3.3	Pemodelan <i>Pressure Drop</i> dengan persamaan Darcy dan Begg's-Brill.....	31
3.4	Perhitungan Peningkatan Produksi Minyak dan Biaya Operasional Injeksi	33
3.5	Teknik Optimisasi	36
3.6	Analisa Hasil dan Pembahasan	37
3.7	Penyusunan Laporan	37
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1	Hasil Pemodelan pada <i>Injection Well</i>	39
4.2	Hasil Pemodelan pada Reservoir	41
4.3	Hasil Pemodelan pada <i>Production Well</i>	44
4.4	Hasil Perhitungan <i>Oil Recovery</i> dan B.Operasional	46
4.5	Analisis Sensitivitas	48
4.6	Optimisasi Biopolimer <i>MEOR</i>	53
BAB V	KESIMPULAN	61
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	62
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	ilustrasi <i>microbial enhanced oil recovery</i>	6
Gambar 2. 2	Skema fungsi biopolimer	8
Gambar 2. 3	Diagram blok <i>genetic algorithm</i>	23
Gambar 2. 4	Mekanisme crossover.....	24
Gambar 2. 5	Mekanisme mutasi	25
Gambar 3. 1	Diagram alir metodologi penelitian.....	29
Gambar 4. 1	Kurva tekanan injeksi <i>MEOR</i> terhadap kedalaman pada <i>injection well</i>	40
Gambar 4. 2	Kurva temperatur injeksi <i>MEOR</i> terhadap kedalaman pada <i>injection well</i>	41
Gambar 4. 3	Kurva tekanan Biopolimer <i>MEOR</i> terhadap lebar interval pada <i>reservoir</i>	43
Gambar 4. 4	Kurva temperatur biopolimer terhadap lebar interval pada <i>reservoir</i>	44
Gambar 4. 5	Kurva tekanan biopolimer terhadap kedalaman pada <i>production well</i>	45
Gambar 4. 6	Kurva temperatur biopolimer terhadap kedalaman pada <i>production well</i>	46
Gambar 4. 7	Grafik analisis sensitivitas perubahan laju aliran massa <i>MEOR</i> terhadap profit	48
Gambar 4. 8	Grafik analisis sensitivitas perubahan tekanan injeksi <i>MEOR</i> terhadap profit	49
Gambar 4. 9	Grafik sensitivitas perubahan temperatur injeksi <i>MEOR</i> terhadap profit.....	50
Gambar 4. 10	Grafik sensitivitas perubahan konsentrasi injeksi nutrisi terhadap profit.....	51
Gambar 4. 11	Grafik sensitivitas perubahan konsentrasi injeksi bakteri terhadap profit	52
Gambar 4. 12	Plot fitness terbaik setiap generasi GA	55
Gambar 4. 13	Plot fitness terbaik setiap generasi DA	55

- Gambar 4. 14** Grafik tekanan injeksi *MEOR* terhadap kedalaman pada *injection well* setelah dilakukan optimisasi..56
- Gambar 4.15** Grafik temperatur injeksi *MEOR* terhadap kedalaman pada *injection well* setelah dilakukan optimisasi56
- Gambar 4. 16** Grafik tekanan *MEOR* terhadap kedalaman pada *reservoir* setelah dilakukan optimisasi57
- Gambar 4. 17** Grafik temperatur *MEOR* terhadap kedalaman pada *injection well* setelah dilakukan optimisasi..57
- Gambar 4. 18** Grafik tekanan *MEOR* pada *production well* setelah dilakukan optimisasi.....58
- Gambar 4. 19** Grafik temperatur *MEOR* pada *production well* setelah dilakukan optimisasi.....58

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi Bakteri berdasarkan produk dihasilkan	7
Tabel 4. 2 Parameter input pemodelan tekanan dan temperatur pada <i>reservoir</i>	42
Tabel 4. 3 Perhitungan profit <i>MEOR</i>	47
Tabel 4. 4 Variabel-variabel optimal kondisi operasi <i>MEOR</i>	53
Tabel 4. 5 Perhitungan profit <i>MEOR</i> setelah dioptimisasi menggunakan GA.....	54
Tabel 4. 6 Perhitungan profit <i>MEOR</i> setelah dioptimisasi menggunakan DA.....	54
Tabel 4. 7 Hasil profit <i>MEOR</i> setelah dioptimisasi	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi fosil di Indonesia pada saat ini sudah semakin menipis dan pencarian sudah sangat sulit dilakukan, bahkan diprediksi 2030 kita akan betul-betul menjadi *nett importer* energi. PDB rata-rata sebesar 6,04% per tahun dan pertumbuhan penduduk sebesar 0,71% per tahun selama tahun 2016-2050 mengakibatkan laju pertumbuhan kebutuhan energi final sebesar 5,3% per tahun. Untuk itu, kebutuhan energi meningkat dari 795 juta SBM pada tahun 2016 menjadi 4.569 juta SBM pada tahun 2050. Pada tahun 2050, pangsa kebutuhan energi final terbesar adalah bahan bakar minyak (BBM) yakni sebesar 40,1%, diikuti oleh listrik (21,3%), gas (17,7%), batubara (11,0%), dan sisanya LPG, bahan bakar nabati (BBN) dan biomassa masing-masing di bawah 4% [1]. Salah satu cara yang dapat dilakukan dalam memaksimalkan sumber minyak bumi salah satunya dengan cara intensifikasi yakni meningkatkan produksi minyak dengan cara menaikkan *recovery factor* dengan eksplorasi tahap lanjut yang biasa disebut sebagai *Enhanced Oil Recovery (EOR)*.

EOR adalah metode eksplorasi yang digunakan untuk mendapatkan minyak dari *reservoir* setelah dilakukan beberapa tahapan metode primer dan sekunder. Metode primer adalah metode yang memanfaatkan energi alami yang terdapat dalam *reservoir* untuk menggerakkan minyak menuju *production well* dengan ekspansi dari pompa. Metode sekunder adalah metode yang menginjeksikan air untuk mempertahankan tekanan pada *reservoir* ketika laju produksi menurun karena energi alami pada *reservoir* menurun. Metode tersier atau *enhanced oil recovery* dimulai ketika laju produksi menurun kembali dan tidak sebanding dengan biaya operasional dan perawatan dari penginjeksian air sehingga

keuntungan bersih menurun[2]. Dalam melakukan eksplorasi menggunakan metode *EOR* dapat dilakukan dengan beberapa mekanisme seperti *thermal recovery*, *chemical flooding*, *solvent flooding* dan *biothechnological*[2], [3].

Salah satu cara dalam mengeksplorasi minyak menggunakan *EOR* yang saat ini dikembangkan yaitu menggunakan *biothechnological* dengan memanfaatkan bakteri sebagai bahan utama dalam meningkatkan minyak bumi yang biasa dikenal dengan *Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)*. Prinsip dasar *MEOR* adalah memanfaatkan produk metabolit bakteri untuk membantu meningkatkan perolehan minyak yang tersisa atau terperangkap di dalam *reservoir*. Aplikasi *MEOR* menerapkan bakteri yang diinjeksikan bersamaan dengan nutrisi dan akan menghasilkan metabolit dengan senyawa yang mempunyai fungsi sama dengan senyawa kimia yang digunakan pada teknik *chemical flooding* secara in-situ berupa biosurfaktan, biopolimer, asam dan gas yang semuanya dapat membantu dalam meningkatkan produksi minyak[4]. Dalam *reservoir* ditemukan banyak jenis bakteri mulai dari micrba yang bersifat aerob, anaerob dan fakultatif (dapat bersifat aerob dan anaerob). Mengenai kondisi di *reservoir* dan tingkat kesulitan dalam memasok oksigen, bakteri anaerob dianggap lebih layak untuk diinjeksikan dalam sumur minyak, seperti bakteri yang masuk dalam *family Clostridium* dan *Bacillus lichenformis* menghasilkan metabolit berupa biosurfaktan serta bakteri dalam family *Leuconostoc* menghasilkan metabolit berupa biopolimer[5]. Peran biopolimer yang dihasilkan berfungsi meningkatkan viskositas air yang diinjeksikan dan mengurangi permeabilitas media berpori, sehingga dapat meningkatkan *recovery* minyak [6]. Pada *MEOR* bakteri mengalami beberapa tahap siklus hidup mulai dari fase adaptasi, fase eksponensial (pertumbuhan), fase stasioner (tetap) dan fase kematian. Fase eksponensial merupakan fase terpenting dalam memproduksi

metabolit sehingga dibutuhkan model kondisi operasi terbaik pada variabel desain yaitu konsentrasi bakteri dan konsentrasi nutrisi yang mampu memberikan hasil terbaik dalam memproduksi minyak. Perlu dilakukan pertimbangan terkait dengan biaya operasional meliputi pengadaan bakteri, nutrisi, tekanan injeksi dan laju aliran massa injeksi. Jika konsentrasi, laju aliran massa dan tekanan injeksi pada bakteri dan nutrisi dalam proses *MEOR* tidak sesuai maka akan menambah biaya operasional dan minyak yang akan dihasilkan kurang optimal.

Oleh karena itu dengan adanya Tugas Akhir ini, akan dilakukan optimisasi kondisi operasional produksi biopolimer pada *MEOR* agar diperoleh produksi minyak paling maksimal dengan biaya operasional yang paling minimum.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka permasalahan yang diambil dalam Tugas Akhir ini antara lain :

- a. Dibutuhkan pemodelan kondisi operasi biopolimer *microbial enhanced oil recovery* mulai dari *injection well* sampai *production well*.
- b. Dibutuhkan optimisasi peningkatan produksi minyak pada kondisi operasi biopolimer *microbial enhanced oil recovery*.

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dilakukannya tugas akhir ini antara lain :

- a. Memodelkan biopolimer *microbial enhanced oil recovery* mulai dari *injection well* dan *production well*.
- b. Melakukan optimisasi peningkatan produksi minyak pada kondisi operasi biopolimer *microbial enhanced oil recovery*.

1.4 Lingkup Kajian

Adapun lingkup kajian pada tugas akhir ini antara lain melakukan permodelan metabolit menggunakan model monod, pemodelan *pressure drop* menggunakan metode Begg's Brill pada

injection well hingga *production well*, dan metode Darcy pada *reservoir*. Hasil pemodelan tersebut divalidasi menggunakan software PIPESIM dan COMSOL. Variabel yang dioptimisasi adalah variabel yang mempengaruhi kondisi operasi seperti konsentrasi bakteri, laju konsentrasi nutrisi, laju massa injeksi, tekanan injeksi dan temperatur injeksi, sedangkan pH tidak dilakukan optimisasi karena diasumsikan nilai pH didalam *reservoir* bernilai konstan. Teknik optimisasi menggunakan beberapa jenis *stochastic alogrithm* yaitu *Genetic Algorithm* dan *Dualist Algorithm*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

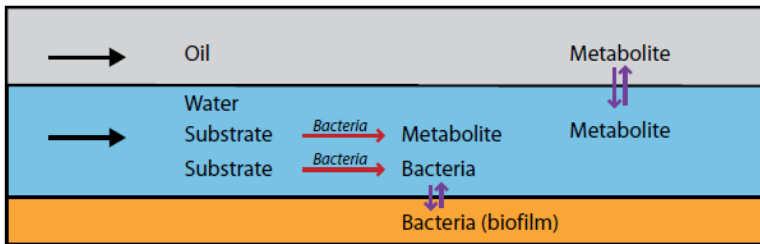
2.1 *Enhanced Oil Recovery (EOR)*

Enhanced Oil Recovery (EOR) adalah metode yang digunakan untuk memperoleh minyak dari *reservoir* setelah dilakukan metode primer dan sekunder. Metode primer adalah metode yang memanfaatkan energi alami yang terdapat dalam *reservoir* untuk menggerakkan minyak menuju *production well* dengan ekspansi dari pompa. Metode sekunder adalah metode yang menginjeksikan air untuk mempertahankan tekanan pada *reservoir* ketika laju produksi menurun karena energi alami pada *reservoir* menurun. Metode tersier atau *enhanced oil recovery* dimulai ketika laju produksi menurun kembali dan tidak sebanding dengan biaya operasional dan perawatan dari penginjeksian air sehingga keuntungan bersih menurun.

Terdapat beberapa metode *EOR*, antara lain yang umum digunakan *thermal recovery*, *solvent flooding*, dan *chemical flooding*. Serta beberapa metode dalam tahap pengembangan *microbial flood*, *gravity drainager mining*. *Thermal recovery* menginjeksi panas ke dalam formasi batuan minyak bumi, meliputi *steamflooding*, injeksi uap siklik, dan *in situ combustion*. *Solvent flooding* menginjeksi bahan terlarut ke formasi batuan. Baik itu *miscible* maupun *immiscible*. Bahan yang biasanya digunakan karbon dioksida, hidrokarbon, dan nitrogen. *Chemical flooding* menginjeksikan air bercampur bahan kimia yang ditambahkan ke dalam formasi batuan, meliputi *surfactant flooding*, *polymer flooding*, dan *alkaline flooding*[7].

2.2 Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR)

Microbial Enhanced Oil Recovery adalah tahap tersier dalam meningkatkan produksi minyak pada sumur-sumur yang mengalami penurunan produksi dengan memanfaatkan bakteri asli maupun hasil injeksi. Layaknya manusia, dalam upaya meningkatkan produksi minyak bakteri membutuhkan energi berupa nutrisi (substrat) yang diinjeksikan ke dalam *reservoir*. Berikut adalah proses *microbial enhanced oil recovery* dapat dilihat pada gambar 2.1 dibawah ini:



Gambar 2. 1 ilustrasi *microbial enhanced oil recovery*

Bakteri dan nutrisi memiliki hubungan yang linier dimana semakin besar konsentrasi nutrisi yang diinjeksikan maka siklus pertumbuhan bakteri akan lebih cepat sehingga minyak yang dihasilkan semakin meningkat. Selain nutrisi, pertumbuhan bakteri juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pH, suhu dan kelembaban. Dalam siklus hidupnya bakteri mampu bertahan hidup pada pH antara 3 – 7 dan apabila pH semakin asam menyebabkan bakteri tidak dapat menerima nutrisi dengan baik sedangkan suhu ideal bakteri berada pada suhu dibawah 82°C. Didalam *reservoir* terdapat banyak jenis bakteri yang setiap jenisnya memiliki karakteristik sendiri dalam memproduksi metabolit. Metabolit yang dihasilkan oleh bakteri dapat berupa biosurfaktan, biopolimer, bioasam, dan gas[8]. Adapun klasifikasi dalam setiap jenis bakteri dapat dilihat pada tabel 2.1 dibawah ini:

Tabel 2. 1 Klasifikasi Bakteri berdasarkan produk yang dihasilkan

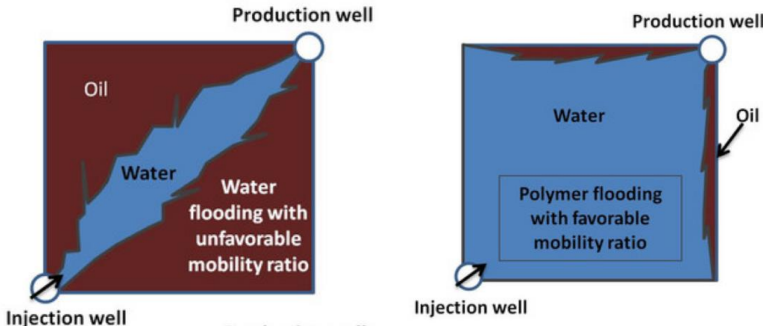
Family	Respiration type	Products
<i>Clostridium</i>	Anaerobic	Gases, acids, alcohols and surfactants
<i>Bacillus</i>	Facultative	Acids and surfactants
<i>Pseudomonas</i>	Aerobic	Surfactants and polymers, can degrade hydrocarbons
<i>Xanthomonas</i>	Aerobic	Polymers
<i>Leuconostoc</i>	Facultative	Polymers
<i>Desulfovibrio</i>	Anaerobic	Gases and acids, sulfate-reducing
<i>Arthrobacter</i>	Facultative	Surfactants and alcohols
<i>Corynebacterium</i>	Aerobic	Surfactants
<i>Enterobacter</i>	Facultative	Gases and acids

2.3 Biopolimer *MEOR*

Salah satu produk metabolit dari *MEOR* adalah biopolimer. Xanthan Gum merupakan salah satu bentuk biopolimer berupa heteropolisakarida ekstraseluler hasil dari injeksi bakteri *Xanthomonas campestris* dengan nutrisi[9]. Biopolimer dalam proses eksploitasi minyak berfungsi untuk meningkatkan viskositas air sehingga dapat mendorong minyak yang terperangkap pada batuan. Selain itu, biopolimer juga mampu mengurangi permeabilitas batuan *reservoir* sehingga dapat mengurangi kecepatan fluida injeksi dan berdampak pada peningkatan jumlah minyak yang dihasilkan[10]. Tujuan utama dari injeksi biopolimer *MEOR* yaitu sebagai kontrol mobilitas dengan cara *sweep efficiency* dengan mengurangi rasio mobilitas. Penurunan rasio mobilitas dicapai dengan cara meningkatkan viskositas air.

Nilai rasio mobilitas yang menguntungkan yaitu maksimal bernilai 1, yang menunjukkan bahwa fluida yang diinjeksikan mengalami perpindahan yang sama dengan fluida yang dipindahkan. Apabila nilai rasio kurang dari 1 maka fluida yang diinjeksikan mengalami perpindahan yang lebih lambat

dibandingkan dengan fluida yang dipindahkan sehingga minyak yang dihasilkan juga semakin besar[11]. Adapun skema fungsi biopolimer dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah ini :



Gambar 2. 2 Skema fungsi biopolimer

2.4 Permodelan Monod Biopolimer

Persamaan monod adalah salah satu cara yang digunakan untuk mendeskripsikan secara empiris pertumbuhan bakteri berdasarkan *Michaelis-Menten Kinetics*[8]. Model Monod ini digunakan untuk menentukan laju rata-rata pertumbuhan spesifik seperti pada persamaan dibawah ini :

$$\mu = \mu_{maks} \frac{N}{K + N} \quad (2.1)$$

Dimana :

- μ = laju rata-rata pertumbuhan spesifik
- N = nilai konsentrasi nutrisi (kg/m³)
- μ_{maks} = laju pertumbuhan maksimum yang diamati
- K = konstanta setengah saturasi

Laju pertumbuhan rata-rata yang didapat kemudian dikalikan dengan konsentrasi bakteri untuk digunakan sebagai salah satu variable dalam *conservation equation*. Persamaan *conservation equation* digunakan untuk menghitung jumlah produksi

metabolit[12]. Adapun tingkat produksi metabolit yang dihasilkan berdasarkan model monod adalah sebagai berikut :

$$\mu_m = \mu_{m,maks} \frac{N - N_{crit}}{K_m + N - N_{crit}} \quad (2.2)$$

Dimana :

μ_m = laju rata-rata pertumbuhan spesifik metabolit

$\mu_{m,maks}$ = laju pertumbuhan maksimum metabolit yang diamati

K_m = konstanta setengah saturasi metabolit

Persamaan diatas identik dengan bentuk persamaan monod (2.1) kecuali pada variable N_{crit} , yang digunakan untuk memodelkan kebutuhan akan konsentrasi nutrisi minimum agar produksi metabolit dapat terjadi. Nilai tersebut kemudian dikalikan dengan konsentrasi bakteri untuk menentukan jangka waktu produksi sumber metabolit. Namun, untuk memastikan bahwa nutrisi tidak digunakan untuk reproduksi bakteri dan produksi metabolit secara bersamaan, diperlukan koefisien hasil berupa Y_i yang bernilai 1. Koefisien tersebut merupakan hasil penjumlahan jumlah nutrisi yang digunakan untuk sampai pada tingkat produksi masing-masing, secara matematis dirumuskan $Y_b + Y_m = 1$ sehingga tidak ada nutrisi yang digunakan dua kali. Oleh karena itu, istilah reaksi bakteri dan metabolit sebagai berikut:

$$R_b = \mu_b \times B \times Y_b \quad (2.2)$$

$$R_m = \mu_m \times B \times Y_m \quad (2.3)$$

Dimana :

R_b = reaksi bakteri dalam *conservation equation*

R_m = reaksi metabolit dalam *conservation equation*

μ_b = laju rata-rata pertumbuhan spesifik bakteri

μ_m = laju rata-rata pertumbuhan spesifik metabolit

B = nilai konsentrasi bakteri (kg/m^3)

Penggunaan R digunakan untuk membedakan antara reaksi in situ dan ex situ. Istilah tersebut kemudian digunakan untuk menentukan reaksi ketika jumlah nutrisi mengalami pengurangan dengan matematis seperti dibawah ini :

$$R_n = -R_b - R_m \quad (2.4)$$

Untuk menggambarkan pertumbuhan bakteri dalam media berpori secara spesifik maka harus menggabungkan model Monod dan model *reservoir* minyak-air. Pada dasarnya komponen MEOR adalah partikel mikroskopis, yang hanya diangkut dalam fase air dan tidak ada perubahan eksplisit pada kecepatan aliran. Adapun model tersebut dapat dijelaskan menggunakan model *conservation equation* biopolimer sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_\omega \phi B}{\beta_\omega} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{U}_\omega}{\beta_\omega} B \right) - \tilde{q}_b - R_b = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_w \phi M_p}{\beta_w} \right) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{rock} (1 - \phi)) + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{u}_m M_p}{\beta_w} \right) - R_m = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_\omega \phi B}{\beta_\omega} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{U}_\omega}{\beta_\omega} N \right) - \tilde{q}_n - R_n = 0 \quad (2.7)$$

Dimana :

- S_ω = Rasio saturasi air
- ϕ = Porositas batuan
- β_ω = Faktor voume pembentuk air
- q_b = *conservation equation* untuk konsentrasi bakteri
- q_n = *conservation equation* untuk konsentrasi nutrisi
- M_p = konsentrasi biopolimer (kg/m³)
- \vec{U}_ω = Kecepatan darcy pada air (m/s)
- \vec{u}_m = Kecepatan darcy pada biopoimer (m/s)
- ρ_{rock} = Massa jenis batuan (kg/m³)

2.5 Permodelan Metode Begg's-Brill

Begg's-Brill pada tahun 1973 melakukan percobaan dengan mendapatkan persamaan gradien tekanan pada aliran multifase dengan analisa kesetimbangan energi dan mengasumsikan tidak ada gaya eksternal dari atau terhadap fluida alir[13].

$$\frac{dp}{dz} = \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{friction} + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{elevation} + \left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{acceleration} \quad (2.8)$$

Pressure Drop pada aliran *single-phase* dan *multi-phase* terjadi karena adanya gaya gesek, perbedaan elevasi atau perubahan energi potensial, dan akselerasi atau perubahan energi kinetik. Rugi akselerasi begitu kecil sehingga dapat diabaikan.

Rugi friksi akibat aliran *single-phase* dan *multi-phase* terjadi adanya gesekan fluida dengan pipa. Selain itu rugi friksi juga dipengaruhi oleh pola aliran. Terdapat 3 pola aliran yaitu *segregated*, *intermediate*, dan *distributed*. Rugi friksi ditentukan melalui persamaan 2.9

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{friction} = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} \quad (2.9)$$

Dimana :

- f_{tp} = Faktor gesekan dua fase
- G_m = Laju flux massa campuran (kg/m²s)
- v_m = Kecepatan massa campuran (m/s)
- g_c = Faktor gravitasi
- d = Diameter aliran (m)

Persamaan faktor gesekan untuk aliran *single phase* dengan aliran *turbulent* dan *rough wall pipeline* telah diusulkan oleh Jain dan dibandingkan tingkat akurasi dengan persamaan *Colebrook*. Jain menemukan bahwa untuk *range* dari *relative roughness* antara 10⁻⁶ dan 10⁻² dan *range* dari *Reynolds number* antara 5x10⁻³ dan 10⁸ memiliki *error* sebesar ±1%. Faktor gesekan tersebut dinyatakan dalam persamaan (2.10)

$$\frac{1}{\sqrt{f_{tp}}} = 1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon}{d} + \frac{21.25}{N_{Re}^{0.9}} \right) \quad (2.10)$$

Dimana

- f_{tp} = Faktor Gesekan
 N_{Re} = Reynold Number
 d = Diameter pipa
 ε = kekasaran pipa

Sedangkan persamaan faktor gesekan untuk aliran *multiphase* didapatkan dari nilai *holdup* pada kemiringan tertentu. Nilai *holdup* tersebut dapat diketahui dengan cara membandingkan nilai *holdup* pada kemiringan tertentu (θ), dengan kemiringan 0° . Sehingga *holdup* pada kemiringan tertentu dinyatakan dalam persamaan (2.11)

$$\frac{H_L(\theta)}{H_L(0)} = \Psi \quad (2.11)$$

dimana

- $H_L(\theta)$ = Holdup pada kemiringan θ
 $H_L(0)$ = Holdup pada aliran horizontal
 Ψ = faktor koreksi inklinasi

Faktor koreksi inklinasi dapat diprediksi untuk seluruh kondisi aliran dengan persamaan berikut:

$$\Psi = 1 + C(\sin \theta - 1/3(\sin \theta)^3) \quad (2.12)$$

Dengan nilai $\theta = 1,8\theta$, pada kasus ini nilai θ adalah -90 karena aliran vertikal kebawah. Nilai koefisien C tergantung pada pola aliran sesuai analisis Begg's-Brill. Persamaan untuk menghitung fraksi *holdup* pada pola aliran *segregated*, *intermittent*, dan *distributed* dinyatakan dalam Persamaan (2.13), (2.14), dan (2.15). Persamaan untuk menghitung koefisien C pada

pola aliran *segreated*, *intermittent*, dan *distributed* dinyatakan dalam Persamaan (2.16), (2.17), dan (2.18).

$$H_L(0) = \frac{0.98 (\lambda)^{0.4846}}{(N_{FR})^{0.0868}} \quad (2.13)$$

$$H_L(0) = \frac{0.84 (\lambda)^{0.5351}}{(N_{FR})^{0.0173}} \quad (2.14)$$

$$H_L(0) = \frac{1.06 (\lambda)^{0.5824}}{(N_{FR})^{0.0609}} \quad (2.15)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7 N_{LV}^{0.0868}}{\lambda^{0.3692} N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.16)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7 N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.17)$$

$$C = (1 - \lambda) \ln \left[\frac{4.7 N_{LV}^{0.1244}}{\lambda^{0.3692} N_{FR}^{0.5056}} \right] \quad (2.18)$$

Pola aliran dapat diprediksi dengan melihat perbandingan bilangan Froude (N_{FR}) dengan konstanta pembatas L_1 dan L_2 dengan kriteria sebagai berikut:

- Jika $N_{FR} < L_1$ maka pola aliran *segreated*
- Jika $N_{FR} > L_1$ dan $N_{FR} > L_2$ maka pola aliran adalah *distributed*
- Jika $L_1 < N_{FR} < L_2$ maka pola aliran *intermittent*

Dengan L_1 dan L_2 dinyatakan dalam persamaan :

$$L_1 = \exp (-4.62 - 3.757X - 0.481X^2 - 0.0207X^3) \quad (2.19)$$

$$L_2 = \exp (1.061 - 4.602X - 1.609X^2 - 0.179X^3 + 0.635 \times 10^{-3}X^5) \quad (2.20)$$

Dimana:

$$X = \ln(\lambda)$$

$$\lambda = \text{Input liquid content} = qL/(qL+qg)$$

qL : Laju volumetrik zat cair (m³/s)

qg : Laju volumetrik zat gas (m³/s)

Begg's-Brill menggunakan faktor gesekan dua fase (f_{tp}) yang dinormalisasi dengan membagi dengan nilai asumsi tanpa slip yang berlaku apabila fluida mengalir pada kecepatan yang sama. Faktor koreksi tanpa slip diperoleh dari diagram Moody atau untuk pipa yang halus diperoleh dari Persamaan (2.21):

$$f_{ns} = \left[2 \log \left(\frac{N_{RE}}{4.5223 \log(N_{RE}-3.8215)} \right) \right]^{-2} \quad (2.21)$$

Persamaan untuk mendapatkan faktor gesekan dua fase adalah

$$\frac{f_{tp}}{f_{ns}} = e^S \quad (2.22)$$

Dengan nilai S diperoleh dari:

$$S = \frac{\ln y}{-0.0523 + 3.182 \ln y - 0.8725 (\ln y)^2 + 0.01853 (\ln y)^4} \quad (2.23)$$

$$y = \frac{\lambda}{[H_L(\theta)]^2} \quad (2.24)$$

Untuk nilai interval $1 < y < 1.2$ nilai S dapat ditentukan dengan persamaan:

$$S = \ln(2.2y - 1.2) \quad (2.25)$$

Rugi elevasi adalah berkurangnya tekanan fluida dikarenakan fluida kehilangan tekanan hidrostatis dan dipengaruhi oleh densitas fluida serta tinggi kolom fluida. Menurut Begg's-Brill, *Pressure drop* bisa diprediksi dengan menghitung fraksi

holdup. Fraksi cairan *holdup* adalah fraksi volume cairan di dalam suatu elemen dibandingkan terhadap volume keseluruhan elemen. Rugi elevasi dapat ditentukan melalui persamaan 2.26

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right)_{elevation} = \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] x \sin\theta \quad (2.26)$$

Dimana :

- g = Percepatan gravitasi (m/s^2)
- ρ_L = Massa jenis liquid (kg/m^3)
- H_L = Fraksi *holdup*
- ρ_g = Massa jenis gas (kg/m^3)
- θ = Sudut kemiringan dari horizontal

Pada penelitian ini, aliran yang digunakan adalah aliran pada pipa vertikal ke atas, sehingga sudut kemiringan θ adalah 90. Sehingga dengan melakukan substitusi dihasilkan persamaan *pressure drop* total pada persamaan 2.27

$$\left(\frac{\partial p}{\partial z}\right) = \frac{f_{tp} \cdot G_m \cdot v_m}{2 \cdot g_c \cdot d} + \frac{g}{g_c} [\rho_L H_L + \rho_g (1 - H_L)] \quad (2.27)$$

2.6 Permeabilitas

Permeabilitas adalah kemampuan medium berpori (dalam hal ini lapisan formasi batuan pada *reservoir*) untuk menghantarkan fluida. Semakin besar nilai permeabilitas, semakin besar pula aliran fluida yang dapat dihantarkan melalui medium tersebut. Darcy melakukan penelitian dan didapatkan hubungan sebagai berikut[14].

$$q = \frac{c \Delta P}{L} \quad (2.28)$$

Dimana :

- q = laju volumetrik aliran fluida (m^3/s)
- ΔP = Perbedaan tekanan dari titik awal hingga titik akhir (psi)
- A = Luas area yang dilalui fluida (m^2)

L = Panjang medium yang dilalui (m)

Nilai c didapatkan dari invers proporsional viskositas fluida yang digunakan dengan persamaan berikut

$$c = \frac{k}{\mu} \quad (2.29)$$

Dimana :

k = Nilai permeabilitas dari medium dengan dimensi cm^2

μ = Nilai viskositas fluida

Sehingga persamaan 2.28 dapat disubstitusi ke persamaan 2.29 menjadi persamaan berikut :

$$\Delta P = \frac{q\mu L}{kA} \quad (2.30)$$

Untuk mengukur nilai permeabilitas yang dinamakan Darcy yaitu 1 Darcy = $9.87 \times 10^{-13} \text{ m}^2$. Maka melalui persamaan diatas bisa didapatkan nilai *pressure drop* pada *reservoir* dengan mengetahui nilai permeabilitas formasi batuan, viskositas fluida, luas dan panjang *reservoir*, serta laju volumetrik aliran fluida.

2.7 Reynold Number

Reynold number merupakan bilangan tak berdimensi yang merepresentasikan rasio antara gaya inersia dan gaya *viscous*.

$$N_{re} = \frac{\text{Inertia Forces}}{\text{Viscous Forces}} \quad (2.31)$$

Reynold number sering digunakan untuk mempelajari analisis dimensi dari masalah dinamika fluida yang ada didunia nyata. Selain itu, *reynold number* juga biasa digunakan untuk menentukan perbedaan aliran yang ada:

- *Laminar flow*, terjadi ketika *Reynolds number* dibawah 2000
- *Transition Flow*, terjadi ketika *Reynolds number* diantara 2000 dan 4000

- *Turbulent Flow*, terjadi ketika *Reynold number* diatas 4000

Reynold number digunakan sebagai angka berbagai situasi dimana fluida yang bergerak dengan berbagai gaya di permukaan. Definisi ini secara umum termasuk pengaruh dari *density* dan *viscosity*, ditambah *velocity* dan karakteristik panjang atau karakteristik dimensi[15]. *Reynold number* dinyatakan dalam Persamaan (2.32).

$$N_{re} = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.32)$$

dimana:

N_{Re}	= <i>Reynold number</i>
ρ	= <i>density</i> (kg/m ³)
v	= <i>velocity</i> (m/s)
d	= <i>diameter of pipe</i> (m)
μ	= <i>dynamic viscosity</i> (Pa.s)
ν	= <i>kinematic viscosity</i> (m ² /s)

2.8 Hukum Darcy

Hukum Darcy merupakan persamaan yang mendefinisikan kemampuan fluida yang mengalir pada media berpori. Pada awalnya hukum Darcy diperkenalkan sebagai hubungan empiris berdasarkan percobaan pada aliran tunak dalam saringan pasir vertikal homogen. Di antara yang paling berpengaruh terhadap aliran yang terjadi pada *reservoir* tersebut adalah porositas dan luas permukaan spesifik S_0 dimana hal tersebut juga mempengaruhi nilai permeabilitas dan berdampak pada besar *pressure drop* *pressure drop* yang dihasilkan.

Darcy Number adalah angka tak berdimensi (*dimensionless number*) yang digunakan oleh dinamika aliran melalui media berpori dan ditemukan dari bentuk diferensial dari hukum Darcy [16]:

$$D_a = \frac{K}{L^2} \quad (2.33)$$

dimana:

- D_a = Darcy Number
 K = permeabilitas dari media (m^2)
 L = panjang media (m)

Hukum Darcy menyatakan bahwa medan kecepatan (*velocity field*) ditentukan oleh gradien tekanan, viskositas fluida, dan struktur dari media berpori, persamaannya adalah sebagai berikut:

$$\mathbf{u} = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad (2.34)$$

dimana:

- \mathbf{u} = kecepatan Darcy (m/s)
 K = permeabilitas formasi batuan (m^2)
 μ = viskositas dinamik fluida (kg/m.s)
 p = tekanan (Pa)

Sedangkan kombinasi antara hukum Darcy dan persamaan kontinuitas adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_m \quad (2.35)$$

dimana:

- ρ = densitas fluida (kg/m^3)
 ϵ_p = porositas (*dimensionless*)
 Q_m = sumber massa ($kg/m^3.s$)

2.9 Porositas

Karakteristik penting dari tempat *reservoir* minyak pada formasi batuan adalah porositas. Untuk mengandung minyak dan gas formasi batuan tidak hanya harus memiliki pori, tapi pori-pori harus juga cukup besar dan saling terhubung agar minyak dan gas

dapat bergerak melalui formasi batuan. Dengan kata lain, formasi batuan harus cukup berpori berkenaan dengan minyak bumi jika berfungsi sebagai *reservoir* minyak[17]. Porositas didefinisikan sebagai rasio dari ruang pori untuk keseluruhan volume, dan pada umumnya dinyatakan dengan persen. Rumus dari persentasi porositas adalah sebagai berikut :

$$\text{persen porositas} = \frac{\text{pore volume}}{\text{bulk volume}} \times 100 \quad (2.36)$$

2.10 Pemodelan Transfer Panas pada *Injection* atau *Production Well*

Besarnya kalor yang hilang setiap satuan kedalaman, merupakan fungsi dari jari-jari tubing (r_{to}), *Overall heat transfer coefficient* (U_{to}), suhu uap (T) dan suhu batuan diluar tubing (T_h). Persamaan perpindahan panas ini dinyatakan seperti pada persamaan [18]:

$$\frac{dQ}{dZ} = 2\pi r_{to} U_{to} (T - T_h) \quad (2.38)$$

dimana:

Q = heat quantity (kJ)

Z = distance (m)

r_{to} = tube ratio (m)

U_{to} = overall heat transfer coefficient ($\text{W}/\text{m}^2\text{-K}$)

T = temperatur (C)

T_h = temperatur ambien (C)

2.11 Pemodelan Transfer Panas pada *Reservoir*

Setelah melewati *injection well*, biopolimer akan terdistribusi pada *reservoir* dengan properti PVT tertentu. Perpindahan panas dari biopolimer ke *reservoir* menggunakan persamaan kesetimbangan perpindahan panas yang dirumuskan sebagai berikut :

$$Q_1 = Q_2 + Q_{total\ losses} \quad (2.39)$$

dimana:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \text{energi panas awal (kJ)} \\ Q_2 &= \text{energi panas setelah melalui } reservoir \text{ (kJ)} \\ Q_{total\ losses} &= \text{energi panas yang hilang (kJ)} \end{aligned}$$

Sementara itu, nilai energi Q_1 dan Q_2 didapatkan dari persamaan [19]:

$$Q_1 = m_{biopolimer} C_{p1} T_1 \quad (2.40)$$

$$Q_2 = m_{biopolimer} C_{p2} T_2 \quad (2.41)$$

dimana:

$$\begin{aligned} m_{biopolimer} &= \text{massa biopolimer (kg)} \\ C_{p1} &= \text{heat capacity sebelum } reservoir \text{ (kJ/kg-C)} \\ C_{p2} &= \text{heat capacity sesudah } reservoir \text{ (kJ/kg-C)} \\ T_1 &= \text{temperatur sebelum } reservoir \text{ (C)} \\ T_2 &= \text{temperatur sesudah } reservoir \text{ (C)} \end{aligned}$$

Terdapat sejumlah energi yang hilang selama perambatan biopolimer dari *injection well* sampai ke *production well* baik secara konduksi maupun konveksi. Energi yang hilang tersebut dapat diturunkan melalui persamaan berikut:

$$Q_{total\ losses} = \frac{T_1 - T_\infty}{R_{konduksi} + R_{konveksi}} \quad (2.42)$$

dimana:

$$\begin{aligned} T_\infty &= \text{temperatur } reservoir \text{ (K)} \\ R_{konduksi} &= \text{hambatan panas konduksi (m}^2\text{-K/W)} \\ R_{konveksi} &= \text{hambatan panas konveksi (m}^2\text{-K/W)} \end{aligned}$$

Nilai $R_{konduksi}$ dan $R_{konveksi}$ dihitung dengan persamaan berikut:

$$R_{\text{konduksi}} = \frac{L_p}{k A_p} \quad (2.43)$$

$$R_{\text{konveksi}} = \frac{1}{h A_p} \quad (2.44)$$

dimana:

L_p = lebar *reservoir* (m)

k = konduktifitas panas (W/m-K)

A_p = luas *reservoir* (m²)

h = *convective heat transfer coefficient* (W/m²K)

Nilai h adalah *convective heat transfer coefficient* didapat dari persamaan *Nusselt Number* yang dilambangkan dengan Nu . *Nusselt Number* dapat diturunkan dari nilai *Reynold Number* (Re) dan *Prandtl Number* (Pr).

$$Nu = \frac{0.255}{\varphi} Re^{2/3} Pr^{1/3} = \frac{h L_p}{k} \quad (2.45)$$

dimana:

R = resistansi panas (m²-K/W)

Nu = *Nusselt Number*

Re = *Reynold Number*

Pr = *Prandlt Number*

2.12 Genetic Algorithm

Secara umum *Genetic Algorithm* (GA) adalah salah satu metode yang digunakan dalam optimisasi untuk mendapatkan nilai maksimum dari formuasi permasalahan dengan mengadopsi ilmu biologis. *GA* memiliki keunggulan-keunggulan dibandingkan dengan metode-metode stokastik yang lain, yaitu:

- *GA* menyelesaikan masalah dengan mengkodekan permasalahan menjadi kromosom, bukan dengan menyelesaikan permasalahan itu sendiri. Karena itu diperlukan pemodelan kromosom yang baik dan efektif

yang dapat mewakili solusi dari permasalahan yang dihadapi.

- *GA* memulai prosesnya dengan sekumpulan *initial solutions*, berbeda dengan metaheuristic lain yang memulai proses dengan sebuah solusi tunggal, dan berlanjut ke solusi lainnya melalui suatu transisi.
- Hanya diperlukan sebuah fungsi evaluasi tunggal yang berbeda untuk tiap permasalahan.

Suatu *Genetic Algorithm* standar membutuhkan dua hal untuk didefinisikan, yaitu:

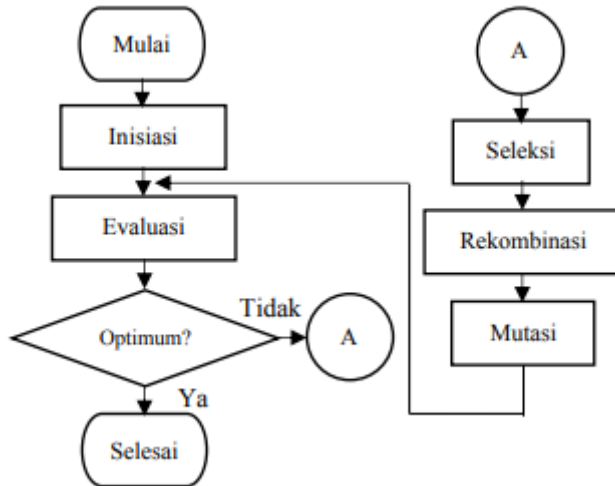
1. Sebuah *genetic representation* dari sebuah *solution domain* (domain solusi),
2. Sebuah *fitness function* untuk mengevaluasi sebuah domain solusi.

Representasi standar dari solusinya adalah sebuah *array of bits* (larik bit). Properti utama yang membuat representasi genetik ini baik adalah bagian-bagiannya yang bisa diakses dengan mudah karena ukuran yang pasti (*fixed*), yang memudahkan suatu operasi persilangan yang sederhana. Representasi panjang variabel juga digunakan disini, tetapi implementasi persilangan jauh lebih sulit pada kasus ini.

Fungsi penghitung nilai kecocokan (*fitness*) didefinisikan pada representasi genetik dan digunakan untuk mengukur kualitas (*quality*) pada solusi yang direpresentasikan. Fungsi penghitung ini selalu tergantung pada masalah yang ada (*problem dependent*).

Setelah memiliki representasi genetik dan sebuah fungsi untuk mencari nilai kecocokan (*fitness*) terdefinisi, maka *Genetic Algorithm* akan melanjutkan untuk membentuk suatu populasi acak, kemudian meningkatkannya melalui aplikasi yang berulang-ulang dari mutasi, persilangan, dan operator seleksi.

Genetic Algorithm dapat dituliskan dalam berbagai bahasa pemrograman. Namun tahapan logika yang digunakan dalam *GA* adalah sama. Diagram alir optimasi menggunakan *GA* dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Diagram blok optimasi menggunakan *genetic algorithm*[20]

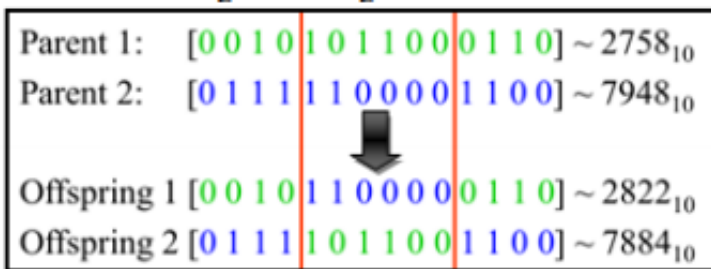
Tahapan-tahapan *genetic algorithm* diantaranya yaitu:

1. Inisiasi
Populasi awal dari kandidat solusi biasanya dicari secara acak dalam seluruh ruang pencarian.
2. Pengkodean kromosom/pembangkitan
Kromosom pada GA merupakan solusi dari satu variabel. Jenis kode yang digunakan adalah biner, yaitu 0 atau 1. Kromosom diwakili oleh beberapa gen. Kromosom dalam bentuk biner merupakan kromosom genotip dan yang berupa solusi adalah kromosom fenotip.
3. Evaluasi
Ketika populasi yang telah diinisiasi atau populasi keturunan terbentuk, nilai fitness dari tiap individu dievaluasi. Nilai fitness merupakan nilai dari kemampuan solusi untuk bertahan.
4. Seleksi
Seleksi mengalokasikan lebih banyak salinan dari solusi dengan fitness yang lebih tinggi dan memberlakukan mekanisme

survival dari tiap fitness pada tiap kandidat solusi. Gagasan utama dari tahapan seleksi adalah untuk mendapatkan solusi terbaik dari generasi terburuk, dan banyak prosedur seleksi telah ditemukan, seperti roulette-wheel, selection stochastic universal, seleksi ranking, seleksi turnamen, dan lain sebagainya.

5. Rekombinasi

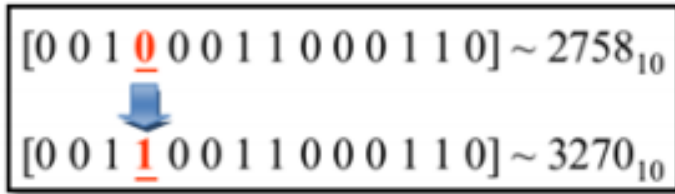
Tahap rekombinasi mengkombinasi bagian dari dua atau lebih solusi induk untuk membentuk individu baru dengan kemungkinan menjadi solusi yang lebih baik. Biasanya rekombinasi menggunakan mekanisme crossover. Pada gambar merupakan mekanisme crossover dimana pada kromosom induk dipotong oleh crossover point sehingga gen-gen pada tiap kromosom bertukar silang dan menghasilkan anak.



Gambar 2. 4 Mekanisme crossover [13]

6. Mutasi

Ketika rekombinasi beroperasi terhadap dua atau lebih kromosom, mutasi lokal tetapi acak memodifikasi sebuah solusi. Dan juga akan terjadi bermacam-macam mutasi, tapi biasanya melibatkan satu atau lebih perubahan sifat individu. Mekanisme mutasi dapat dilihat pada gambar 8.8, salah satu gen pada kromosom awal dimutasi sehingga menghasilkan kromosom baru.



Gambar 2. 5 Mekanisme mutasi [13]

7. Penggantian/elitism

Keturunan hasil dari seleksi, rekombinasi, dan mutasi akan menggantikan populasi induk. Banyak metode penggantian seperti penggantian elitist, penggantian *generation-wise*, dan penggantian *steady-state*.

2.13 Duelist Algorithm

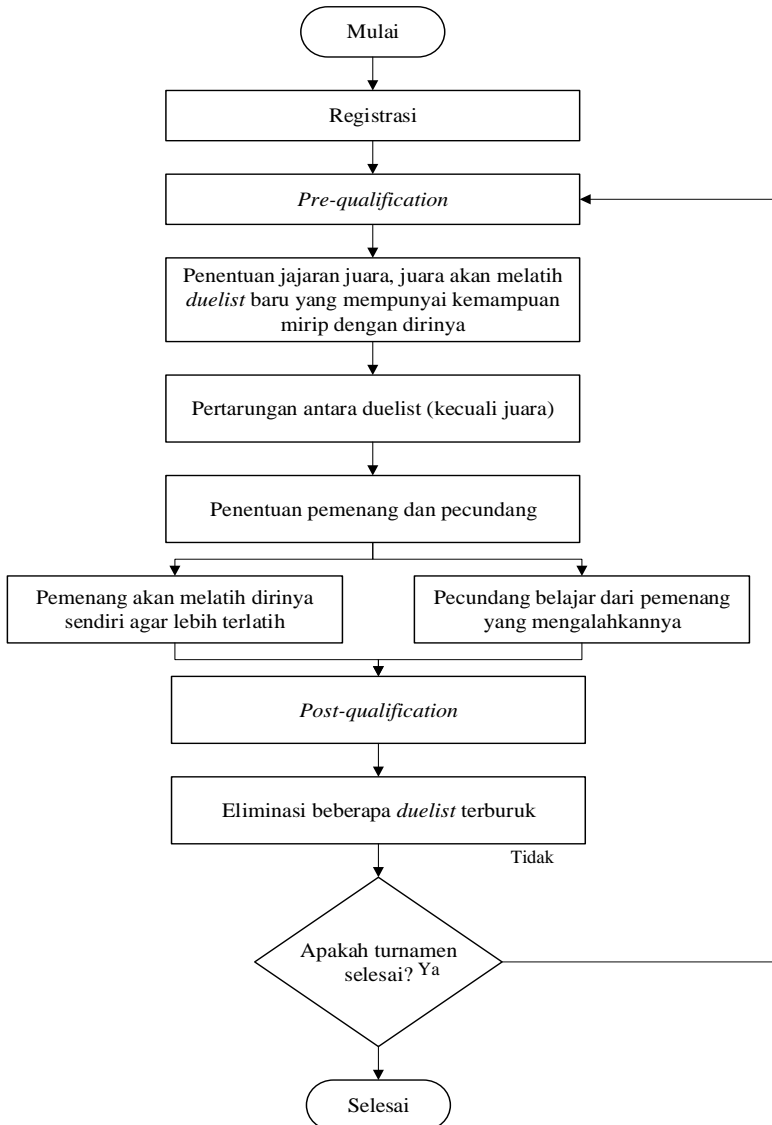
Duelist algorithm merupakan suatu algoritma yang terinspirasi dari pertarungan manusia dan kemampuan untuk meningkatkan kemampuan. Pada *duelist algorithm* setiap individu dalam populasi disebut dengan *duelist*. Setiap *duelist* akan bertarung satu sama lain dengan *duelist* lainnya untuk menentukan juaranya. seorang juara merupakan individu yang terkuat, namun individu yang lemah juga dapat memangkan pertarungan apabila mempunyai faktor keberuntungan.

Tahapan dalam algoritma ini adalah pertama setiap *duelist* memiliki sifat masing-masing yang dikodekan ke dalam array biner dari satu dan nol. Setelah itu, masing-masing petarung dievaluasi untuk menentukan kemampuan bertempur mereka dan kemudian jadwal pertarungan diatur untuk setiap petarung yang berisi satu set peserta pertarungan, dalam pertarungan ini setiap petarung akan bertarung satu lawan satu dengan petarung lainnya seperti *duel gladiator*. Hal ini dilakukan agar menghindari *local optimum*. Setiap pertarungan akan menghasilkan pemenang dan pecundang berdasarkan kemampuan bertarung dan keberuntungan. Setelah pertarungan selsai maka juara ditentukan.

Pada tahap selanjutnya, setiap pemenang dan pecundang masing-masing mempunyai kesempatan untuk meningkatkan

kemampuan bertarung mereka. Setiap pecundang akan belajar dari lawan mereka dengan mengganti beberapa bagian dari *binary array* mereka dengan *binary array* milik pemenang, sedangkan pemenang akan berinovasi mempelajari teknik baru dengan mengganti *binary array* mereka dengan *binary array* baru. Sementara juara akan melatih *duelist* baru sehingga mempunyai kemampuan seperti nya. *Duelist* baru tersebut akan bergabung pada pertandingan selanjutnya.

Kemampuan bertarung setiap *duelist* akan di evaluasi kembali untuk pertandingan selanjutnya pada tahap *post-qualification* dan ditentukan kembali juaranya. Dikarenakan terdapat *duelist* baru yang bergabung, maka *duelist* yang terburuk ketika pertandingan akan dieliminasi. Proses ini akan terus berlanjut hingga turnamen selesai [21].

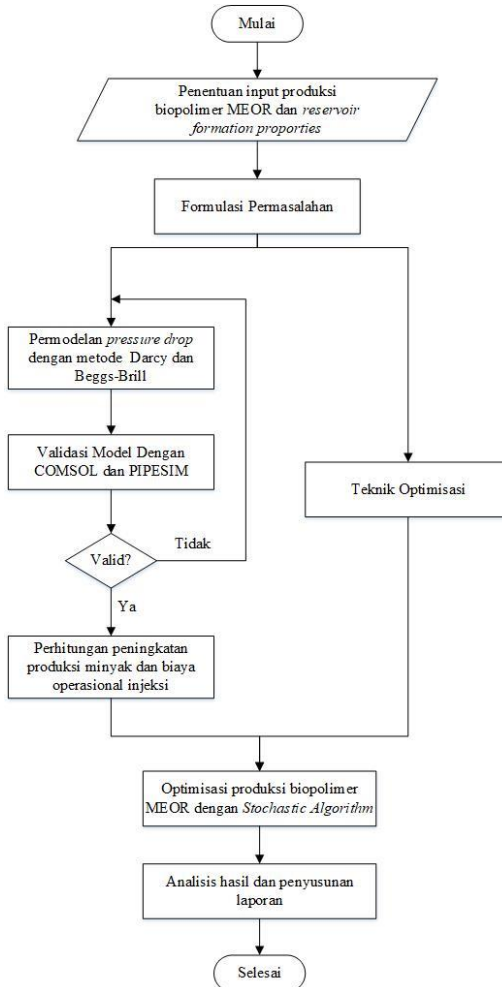


Gambar 2. 6 *Duelist Algorithm flowchart* [21]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Adapun metodologi dalam melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram alir metodologi penelitian

3.1 Penentuan Input Produksi Biopolimer *MEOR* dan *Reservoir Formation Properties*

Kondisi operasi dari produksi biopolimer *MEOR* dan formasi batuan *reservoir* ditentukan. Hal ini bertujuan agar biopolimer *MEOR* dan minyak dapat terangkat ke atas melalui *production well*. Jenis bakteri biopolimer dan nutrisi yang digunakan secara berturut-turut adalah *Bacillus lichenformis* dan *mollase*. Kondisi operasi dari *reservoir* berdasarkan data pada Morrow Consolidated Oil Field, Ohio, USA. Jenis *reservoir* yang digunakan adalah *Copper Ridge Dolomite* yang memiliki permeabilitas 18.1mD, dan porositas 0.07 Parameter ukuran dari *reservoir* dengan ketebalan *reservoir* 10.4 m, jarak antara *injection well* dan *production well* 100 m. Kondisi operasi yang digunakan meliputi tekanan injeksi untuk bakteri dan nutrisi 1087 psi dengan laju injeksi dari bakteri dan nutrisi *MEOR* 0.051 kg/s dan temperatur 31°C[22]. Bentuk *reservoir* diasumsikan berbentuk silinder, dengan tidak ada aliran fluida yang keluar atau masuk ke *control volume (reservoir)*.

3.2 Formulasi permasalahan

Problem formulation terdiri dari *objective function* dan *constraint* dari penelitian yang dilakukan. *Objective function* ditujukan untuk menentukan kearah mana sistem *MEOR* akan dioptimisasikan sedangkan *constraint* adalah batasan dalam optimisasi dari *objective function*. Tujuan dari produksi biopolimer adalah memaksimalkan laju produksi minyak untuk meningkatkan profit. Jumlah produksi minyak sebanding dengan jumlah bakteri dan nutrisi yang diinjeksikan. Namun, semakin banyak bakteri dan nutrisi yang diinjeksikan pada tekanan dan konsentrasi tertentu, semakin besar pula biaya dibutuhkan. Biaya operasional dari penggunaan pompa untuk produksi biopolimer yang telah digunakan juga dipertimbangkan dalam *objective function*. Oleh karena itu, biaya menjadi *objective function* yang akan dimaksimalkan dalam penelitian ini.

$$\begin{aligned} \text{Profit} = & \text{Pendapatan minyak mentah} - & (3.1) \\ & \text{Biaya pembelian Biopolimer} - \\ & \text{biaya operasional pompa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Pendapatan minyak mentah} = & & (3.2) \\ & \text{Laju produksi minyak} \times \text{Harga jual minyak} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya pembelian Biopolimer} = & & (3.3) \\ & (\text{Volume Bacillus} \times \text{Biaya Bacillus per volume}) + \\ & (\text{Volume Mollase} \times \text{Biaya Mollase per volume}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Biaya operasional pompa} = & & (3.4) \\ & \text{Daya pompa} \times \text{lama operasi} \times \text{harga listrik} \end{aligned}$$

3.3 Pemodelan *Pressure Drop* dengan persamaan Darcy dan Begg's-Brill

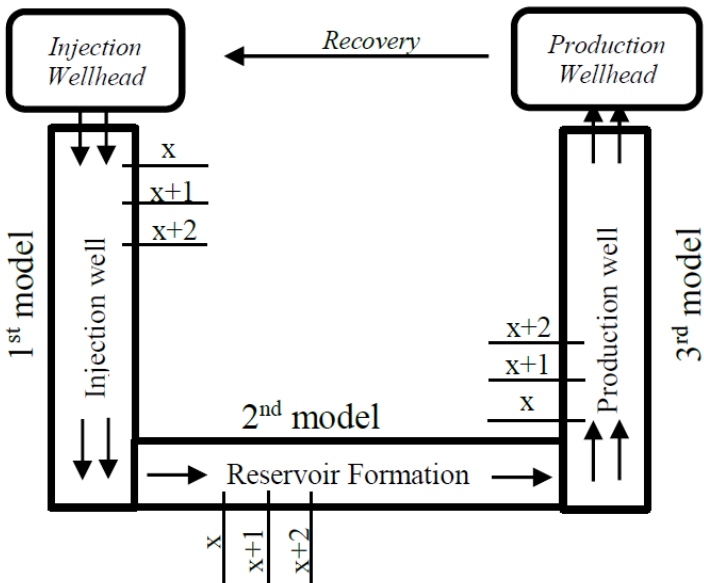
Pada produksi biopolimer *MEOR*, injeksi bakteri dan nutrisi akan mengalami perubahan tekanan, temperatur serta sifat dari fluida. Maka dilakukan penurunan rumus empiris untuk mengetahui perubahan serta dampak yang terjadi. Kondisi awal saat dilakukan injeksi *MEOR* pada *injection well*, *reservoir formation* dan *production well* dapat dimodelkan menggunakan persamaan berikut

$$P_{akhir} = P_{awal} - \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (3.5)$$

$$T_{akhir} = T_{awal} - \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (3.6)$$

Pemodelan *pressure drop* (ΔP_i) pada *injection* dan *production well* menggunakan metode Begg's-Brill dimana persamaan yang digunakan meliputi persamaan (2.8) hingga (2.27) dengan terlebih

dahulu menentukan *reynold number* dari setiap aliran fluida menggunakan persamaan (2.32) dan untuk pemodelan *pressure drop* pada *reservoir formation* menggunakan persamaan Darcy yang ditunjukkan pada persamaan (2.35). Hasil pemodelan akan divalidasi dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PIPESIM dan COMSOL dengan *setpoint error* < 5%. *Injection well* dan *production well* divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM karena cukup mensimulasikan fluida yang mengalir pada pipa. Sedangkan pada *reservoir* dibutuhkan validasi menggunakan perangkat lunak COMSOL untuk mensimulasikan reaksi yang terjadi. Sedangkan nilai ΔT_i dapat dicari menggunakan perpindahan panas pada pipa dan pada media berpori. Dengan mengetahui nilai Q_{akhir} maka temperatur pada keadaan akhir dapat diketahui. Adapun segmentasi *pressure drop* injeksi MEOR dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini:



Gambar 3. 2 Segmentasi *pressure drop* MEOR

3.4 Perhitungan Peningkatan Produksi Minyak dan Biaya Operasional Injeksi

Perhitungan estimasi penambahan jumlah minyak yang dapat diproduksi dari *MEOR* yang akan digunakan untuk perhitungan laju produksi minyak menggunakan metode OTA model yang didasarkan pada daerah yang berkontak dengan proses biopolimer pada *reservoir*[23], untuk memprediksi perolehan setelah *MEOR* yang diinjeksi.

Laju produksi minyak dihitung melalui nilai *additional recovery*, *cummulative production*, laju aliran massa dan lama waktu injeksi *MEOR*. Selain itu, besarnya volume *original oil in place (OOIP)* atau banyaknya minyak yang terdapat dalam *reservoir*.

Dipertimbangkan dalam proses perhitungan laju produksi minyak. Hasil perhitungan laju produksi minyak dapat diperoleh nilai pendapatan yang merupakan perkalian antara laju produksi minyak terhadap harga jual minyak.

$$Pt = Vpd \times Po \quad (3.7)$$

$$Vpd = \frac{Npc}{t} \quad (3.8)$$

$$Npc = \frac{A_p \times h \times \phi \times E_{vm}}{B_o} \times (S_{orw} - S_{of}) \quad (3.9)$$

$$E_{vm} = \frac{\frac{N_p}{N} + \frac{B_{oi}}{B_o} - 1}{\frac{B_{oi}}{B_o} \left(1 - \frac{S_{orw}}{S_{oi}}\right)} \quad (3.10)$$

$$B_o = 1 + \alpha(T_R - 60) \quad (3.11)$$

$$\alpha = 0.000288 + 8.04111 \times 10^{-6} API - (1.890 \times 10^{-7} (API)^2) \quad (3.12)$$

$$t = \frac{Vob}{V_{injeksi}} \quad (3.13)$$

$$Vob = VR \times \phi \quad (3.14)$$

$$V_{injeksi} = \frac{m_{injeksi}}{\rho_{biopolimer}} \quad (3.15)$$

$$m_{injeksi} = M_{bio} \times 3600 \times 24 \quad (3.16)$$

dimana:

P_t = pendapatan (USD/hari)

V_{pd} = laju produksi minyak (bbl/hari)

P_o = harga jual minyak (USD/bbl)

$V_{injeksi}$ = volume injeksi biopolimer (m^3 /hari)

$m_{injeksi}$ = massa injeksi biopolimer (kg/hari)

M_{bio} = konsentrasi biopolimer (kg/m^3)

t = lama waktu injeksi *ASP EOR* (hari)

V_{ob} = volume *original oil in place/OOIP* (bbl)

VR = volume *reservoir* (bbl)

ϕ = porositas *reservoir* (%)

N_{pc} = Minyak yang dipindahkan oleh biopolimer (STB)

A_p = Luas penampang *reservoir* (m^2)

h = Ketebalan *reservoir* (m)

\emptyset = Porositas (%)

E_{vm} = Fraksi volume *reservoir* yang berkontak dengan polimer

B_o = Rasio volume minyak pada tekanan dan temperatur *reservoir* terhadap volume yang ter-recover

S_{orw} = Saturasi minyak pada *reservoir* setelah *waterflooding*

S_{of} = Saturasi minyak pada *reservoir* oleh *chemical flooding*

N_p = Total *recovery* minyak pada fase sebelumnya (STB)

N = Estimasi jumlah minyak awal pada *reservoir* (STB)

B_{oi} = Rasio volume minyak awal yang terdapat pada *reservoir* terhadap volume minyak yang terproduksi

S_{oi} = Saturasi minyak awal

TR = Temperatur *reservoir*

API = Derajat API dari minyak

Untuk mendapatkan biaya pengadaan *MEOR* maka dicari besar laju volumetrik dari setiap komponen *MEOR*, konsentrasi

dan harga satuan dari nutrisi dan bakteri sehingga diperoleh biaya pengadaan *MEOR* yang dibutuhkan untuk memproduksi minyak.

$$Biaya_{MEOR} = q_{MEOR} \times B_{nutrisi} \times H_{nutrisi} + q_{MEOR} \times B_{bakteri} \times H_{bakteri} \quad (3.17)$$

dimana:

$Biaya_{MEOR}$	= biaya <i>MEOR</i> (USD/hari)
q_{MEOR}	= laju volumetric <i>nutrisi</i> (m ³ /hari)
q_{MEOR}	= laju volumetric <i>bakteri</i> (m ³ /hari)
$B_{nutrisi}$	= konsentrasi <i>nutrisi</i> (kg/m ³)
$B_{bakteri}$	= konsentrasi <i>bakteri</i> (kg/m ³)
$H_{nutrisi}$	= harga satuan <i>nutrisi</i> (USD/kg)
$H_{bakteri}$	= harga satuan <i>bakteri</i> (USD/kg)

Biaya operasional pompa untuk *MEOR* dapat dihitung dari energi listrik yang digunakan pompa selama beroperasi. Perhitungan biaya operasional pompa menggunakan hasil pemodelan *pressure drop injection well* hingga *production well* pada tahapan sebelumnya, laju aliran massa fluida, efisiensi pompa, kebutuhan daya listrik pompa, lama operasional pompa, dan tarif dasar listrik per kWh sehingga dapat diperoleh biaya operasional pompa yang digunakan selama proses *MEOR*. Biaya operasional pompa adalah hasil perkalian daya pompa dengan lama operasional pompa dan tarif dasar listrik per kWh[24].

$$W_p = \frac{q \times \Delta P}{\eta} \quad (3.18)$$

$$B_{op} = W_p \times Y \times K \quad (3.19)$$

Dimana:

W_p	= Besar usaha pompa persatuan waktu/ daya (Watt)
ΔP	= <i>pressure drop</i> (Pa)
q	= laju aliran massa fluida (m ³ /s)
η	= efisiensi pompa (%)
B_{op}	= biaya operasional pompa (USD/hr)

- Y = lama operasi pompa (hr)
 K = tarif dasar listrik (USD/kWh)

3.5 Teknik Optimisasi

Optimisasi dilakukan menggunakan *software* MATLAB R2016a untuk mendapatkan kondisi operasi biopolimer *MEOR* yang paling optimal. Teknik optimisasi yang akan digunakan dalam menyusun tugas akhir ini dengan menggunakan metode *stochastic algorithm* yang terdiri dari beberapa macam algoritma yaitu *Genetic Algorithm* (GA) dan *Duelist Algorithm* (DA). Sebelum melakukan optimisasi, beberapa tahapan proses optimisasi adalah dengan menentukan fungsi tujuan optimisasi, variabel optimisasi, dan menentukan *properties* yang dibutuhkan dalam optimisasi. Adapun penjelasan lebih lanjut terkait proses optimisasi sebagai berikut:

- a. Penentuan *objective function*
sesuai dengan permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini maka *objective function* yang diinginkan adalah profit maksimum pada kondisi operasi biopolimer *MEOR*.
- b. Penentuan Variabel Optimisasi
Variabel yang dapat mempengaruhi profit adalah laju aliran massa injeksi, konsentrasi nutrisi, konsentrasi bakteri, tekanan injeksi dan temperatur injeksi.
- c. Penentuan *Properties* Optimisasi
Adapun beberapa *properties* yang dibutuhkan dalam melakukan optimisasi antara lain:
 - Jumlah Populasi
Populasi menentukan jumlah kromosom dan petarung yang terlibat dalam proses optimisasi. Jumlah populasi yang digunakan adalah 100.
 - Iterasi
Iterasi digunakan untuk menentukan jumlah perputaran yang terjadi dalam proses optimisasi. Pada umumnya variasi nilai iterasi untuk mendapatkan hasil terbaik berada pada rentan antara 100 sampai 250. Untuk mendapatkan hasil optimisasi yang bagus maka nilai iterasi harus sama

dengan jumlah populasi maka nilai iterasi yang digunakan adalah 100.

- Jumlah Variabel yang dioptimisasi
Variabel yang mempengaruhi *objective function* yaitu laju aliran massa injeksi, konsentrasi nutrisi, konsentrasi bakteri, tekanan injeksi dan temperatur injeksi maka jumlah variabel yang dioptimisasi adalah 5.
- *Constraint*
Constraint terdiri dari batas atas dan batas bawah yang digunakan sebagai jangkauan untuk mengacak nilai dari variabel yang dioptimisasi agar dapat memenuhi *objective function* yang diinginkan. Adapun batas atas dan batas bawah yang digunakan adalah sebagai berikut:
 - Laju aliran massa injeksi = 0.051 – 0.054 kg/s
 - Konsentrasi nutrisi : 0.5 – 1 kg/m³
 - Konsentrasi bakteri : 0.1 – 0.5 kg/m³
 - Tekanan injeksi : 1087 – 1100 psi
 - Temperatur injeksi : 31 – 41 °C

3.6 Analisa Hasil dan Pembahasan

Pada tahap ini dilakukan analisa pengaruh perubahan salah satu variabel yang dioptimisasi meliputi konsentrasi injeksi dari bakteri, konsentrasi nutrisi, laju aliran massa, tekanan injeksi dan temperatur injeksi terhadap terhadap nilai *objective function* (*net profit*) berdasarkan analisis sensitivitas dan optimisasi yang telah dilakukan pada penelitian ini.

3.7 Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan tugas akhir merupakan pembukuan serta dokumentasi dari semua langkah yang telah ditempuh dalam mengerjakan tugas akhir berupa sebuah tulisan ilmiah.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pemodelan pada *Injection Well*

Pada *injection well* permodelan tekanan menggunakan metode Begg's-Brill sedangkan permodelan temperatur menggunakan persamaan perpindahan panas. Adapun *properties* kondisi operasi yang digunakan adalah sesuai pada Tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Parameter input untuk permodelan gradien tekanan dan temperatur

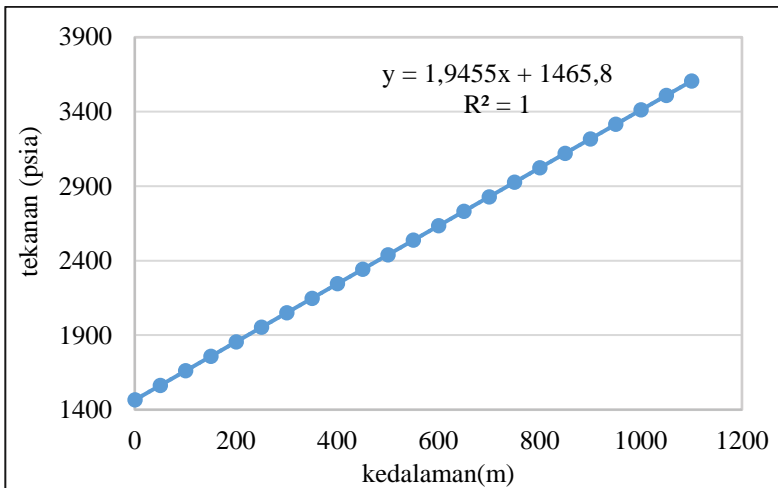
Parameter	Nilai	Satuan
Gravitasi	9.8	m/s ²
Diameter aliran	0.127	m
Kedalaman sumur	1100	m
Tekanan injeksi	1087	Psia
Konsentrasi injeksi <i>MEOR</i>	0.5	kg/m ³
Laju massa uap injeksi	0.051	kg/s
Temperatur injeksi	31	°C
Tebal tubing	0.005385	m
<i>Absolute roughness</i>	0.0001	m

Pemodelan gradien tekanan dan temperatur pada *injection well* menggunakan persamaan Begg's-Brill telah divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM dan didapatkan hasil rata-rata pembacaan untuk tekanan sebesar 0.203% dan temperatur sebesar 3.578%. Hasil validasi ditampilkan pada lampiran A.

Nilai *error* ini dikarenakan adanya perbedaan perhitungan *properties* pada perangkat lunak PIPESIM dan pemodelan dalam *Microsoft Excel*. Pada tugas akhir ini, perhitungan *properties* injeksi *MEOR* menggunakan regresi *multivariable* dari tekanan, temperatur dan konsentrasi injeksi. Sehingga perhitungan

properties pada tugas akhir ini dianggap linier, sementara itu pada *software* PIPESIM perhitungan *properties* injeksi MEOR sesuai dengan keadaan sesungguhnya dimana *properties* injeksi MEOR ini sebenarnya nonlinier.

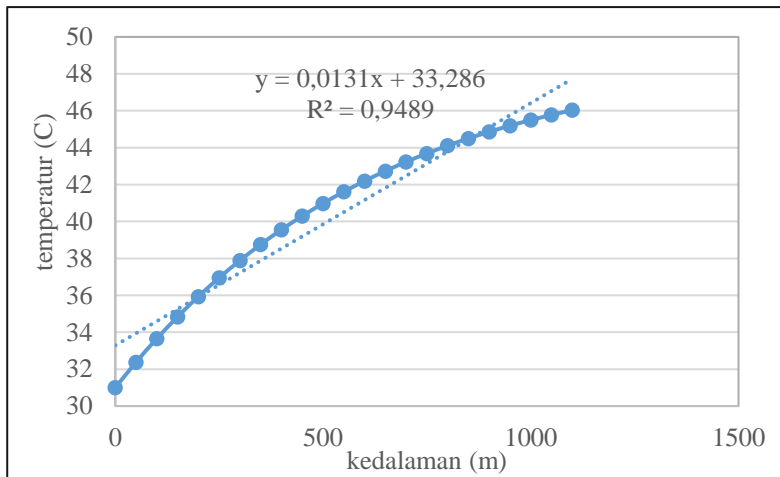
Hasil kurva tekanan injeksi MEOR pada *injection well* menggunakan persamaan Begg's-Brill dengan fungsi kedalaman sumur ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 Kurva tekanan injeksi MEOR terhadap kedalaman pada *injection well*

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa tekanan injeksi MEOR mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya kedalaman dari *injection well*. Berdasarkan kurva tekanan terhadap kedalaman pada *injection well* dapat diamati bahwa nilai *gain* (*slope*) dari injeksi MEOR memiliki nilai yaitu 1.9455. Faktor yang mempengaruhi besarnya *pressure drop* diantaranya perubahan elevasi yang disebabkan oleh kedalaman dari *injection well*. Selain itu diakibatkan karena kekasaran pipa, panjang *tubing*, massa jenis dan viskositas dari fluida yang diinjeksikan dimana fluida injeksi MEOR memiliki nilai viskositas yang kecil.

Sedangkan hasil kurva temperatur injeksi *MEOR* pada *injection well* menggunakan persamaan perpindahan panas dengan fungsi kedalaman sumur yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Kurva temperatur injeksi *MEOR* terhadap kedalaman pada *injection well*

Pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa temperatur injeksi *MEOR* mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya kedalaman dari *injection well*. Hal ini disebabkan oleh perubahan panas yang terjadi karena adanya peningkatan tekanan dan gesekan antara fluida dengan pipa.

4.2 Hasil Pemodelan pada Reservoir

pada *reservoir* pemodelan tekanan dan temperatur dilakukan dengan menggunakan parameter kondisi operasi dari Morrow County, Ohio, USA. Parameter-parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

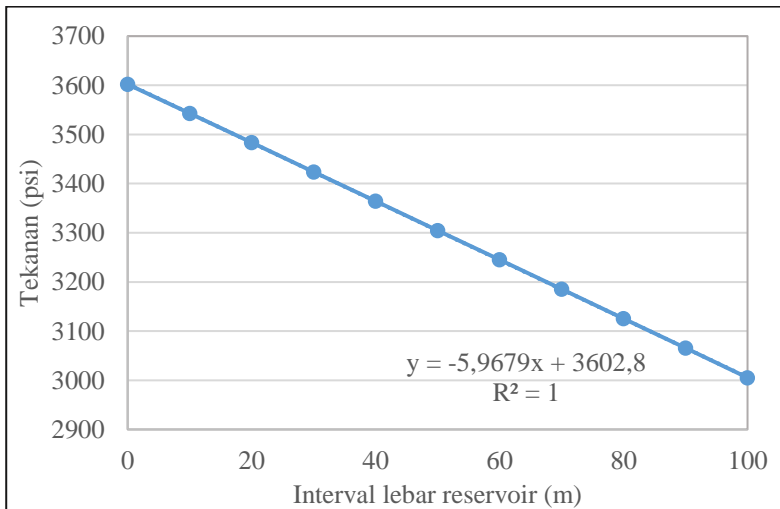
Tabel 4. 2 Parameter input pemodelan tekanan dan temperatur pada *reservoir*

Parameter	Nilai	Satuan
Jarak <i>injection well</i> hingga <i>production well</i>	100.00	m
Ketebalan <i>reservoir</i>	10.40	m
Tekanan <i>reservoir</i>	1087	Psia
Temperatur <i>reservoir</i>	30.56	°C
Permeabilitas batuan	18.10	mD
Porositas batuan	0.07	-
°API	41.00	°API

Parameter kondisi operasi fluida yang digunakan dalam pemodelan tekanan ini, merupakan keluaran dari fluida pada *injection well*. Sedangkan parameter kondisi operasi pada fluida keluaran dari hasil pemodelan tekanan menggunakan persamaan Darcy yang akan digunakan sebagai parameter masukan untuk meakukan pemodelan pada *production well*.

Tekanan pada *reservoir* dimodelkan dengan menggunakan persamaan darcy sedangkan temperatur dimodelkan menggunakan persamaan perpindahan panas yang telah divalidasi dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*. Dari hasil validasi didapatkan hasil rata-rata *error* untuk tekanan sebesar 0.782% dan untuk temperatur sebesar 0.115%. Hasil validasi ditampilkan pada lampiran B. *Error* ini diakibatkan oleh adanya perbedaan perhitungan *properties* secara matematis dari *reservoir* hasil injeksi *MEOR* dengan perhitungan yang dilakukan oleh perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*. Perbedaan perhitungan *properties* ini akan memengaruhi perhitungan tekanan dan temperatur sehingga terdapat selisih hasil perhitungan atau *error* pada pemodelan dan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics*.

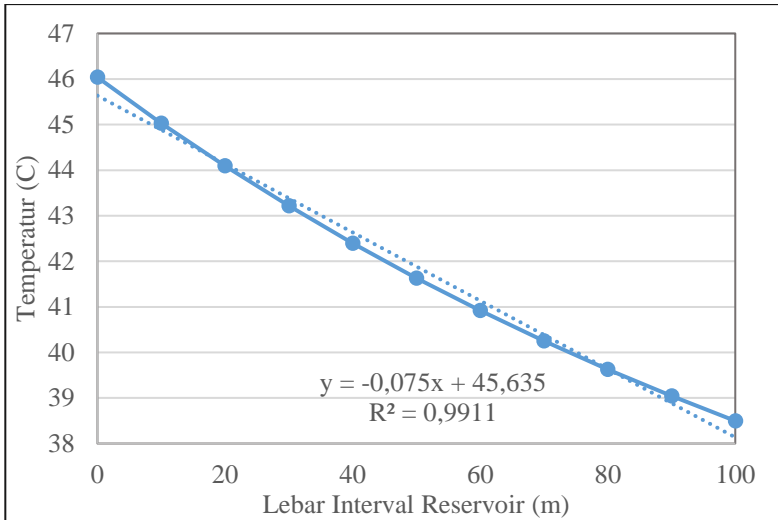
Berdasarkan pemodelan tekanan pada *reservoir* menggunakan Persamaan darcy diperoleh hasil berupa kurva tekanan terhadap jarak dari *injection well* pada *reservoir* yang ditampilkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Kurva tekanan Biopolimer *MEOR* terhadap lebar interval pada *reservoir*

Pada gambar 4.3 menunjukkan bahwa tekanan biopolimer *MEOR* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya panjang dari *reservoir*. Berdasarkan kurva tekanan terhadap kedalaman pada *reservoir* dapat diamati bahwa nilai *gain* (*slope*) memiliki nilai yaitu sebesar 5.9679. Hal ini terjadi dikarena selama melewati *reservoir*, tekanan biopolimer akan mengalami penurunan karena melewati media berpori.

Sedangkan, temperatur pada *reservoir* menggunakan Persamaan perpindahan panas diperoleh hasil berupa kurva temperatur terhadap jarak dari *injection well* pada *reservoir* yang ditampilkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4. 4 Kurva temperatur biopolimer terhadap lebar interval pada *reservoir*

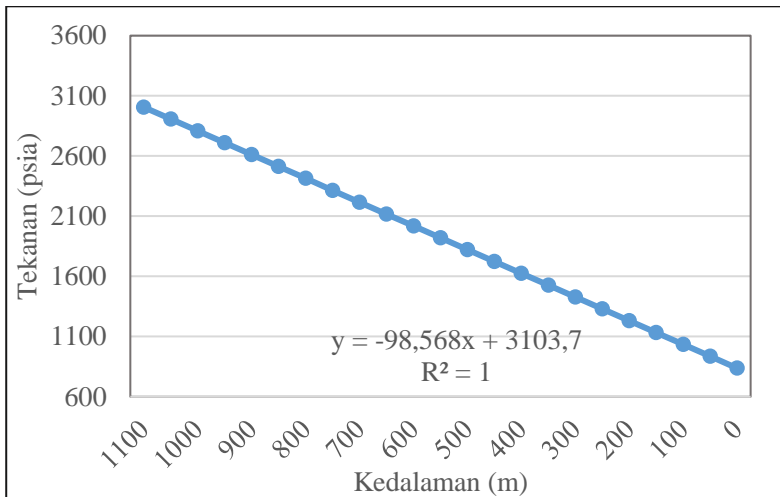
Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa temperatur biopolimer mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya panjang dari *reservoir*. Hal ini disebabkan oleh perubahan panas yang terjadi karena perpindahan panas antara biopolimer dengan *reservoir*, ketika temperatur biopolimer lebih besar daripada temperatur *reservoir*.

4.3 Hasil Pemodelan pada *Production Well*

Pada *production well* permodelan tekanan dilakukan menggunakan metode Begg's-Brill sedangkan permodelan temperatur menggunakan persamaan perpindahan panas. Tekanan dan temperatur dari hasil pemodelan dengan metode Darcy pada *reservoir*, digunakan sebagai parameter input untuk pemodelan pada *production well*. Hasil pemodelan tekanan dan temperatur pada *production well* telah divalidasi dengan perangkat lunak PIPESIM. Pada tekanan didapatkan rata-rata perbedaan sebesar 0.564%, sedangkan temperatur didapatkan rata-rata perbedaan sebesar 1.297%. Hasil validasi ditampilkan pada lampiran C. Hasil

pemodelan tekanan ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan hasil pemodelan temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.6.

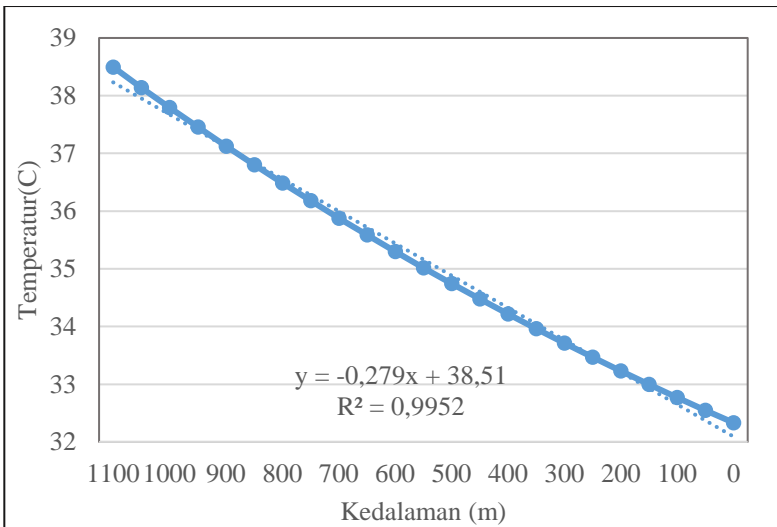
Hasil kurva tekanan biopolimer pada *production well* dianalisa menggunakan persamaan Begg's-Brill dengan fungsi kedalaman sumur ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Kurva tekanan biopolimer terhadap kedalaman pada *production well*

Pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa tekanan fluida mengalami penurunan seiring dengan berkurangnya kedalaman dari *production well*. Berdasarkan kurva tekanan terhadap kedalaman pada *production well* dapat diamati bahwa nilai *gain* (*slope*) memiliki nilai yaitu sebesar 98.568. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah perubahan elevasi karena kedalaman dari *production well*. Sudut elevasi dari *production well* bernilai positif karena dianggap setelah dari *reservoir*, fluida akan terangkat secara horizontal ke atas, sehingga menyebabkan tekanan hidrostatik berkurang pada arah aliran fluida campuran. Selain itu, penurunan tekanan juga disebabkan oleh rugi-rugi

gesekan. Rugi-rugi gesekan ini disebabkan oleh gesekan yang terjadi antara fluida yang mengalir dengan dinding-dinding pipa yang memiliki tingkat kekasaran tertentu sehingga menyebabkan terjadinya perubahan tekanan. Sedangkan hasil kurva temperatur biopolimer pada *production well* menggunakan persamaan perpindahan panas dengan fungsi kedalaman sumur ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Kurva temperatur biopolimer terhadap kedalaman pada *production well*

Pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa temperatur fluida juga mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh perubahan panas yang terjadi karena perpindahan panas antara biopolimer dan minyak dengan lingkungan, ketika temperatur biopolimer dan minyak lebih tinggi daripada temperatur lingkungan.

4.4 Hasil Perhitungan *Oil Recovery* dan Biaya Operasional

Oil recovery merupakan jumlah *crude oil* yang terproduksi setelah penginjeksian molase dan bakteri ke dalam *reservoir*.

Berdasarkan kondisi input yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 diestimasikan bahwa OOIP (*Original Oil in Place*) yang terkandung sebesar 177 MMSTB atau setara dengan 177 juta barrel. kondisi minyak yang sudah terproduksi selama 59 tahun sebesar 59 juta barrel sehingga didapatkan laju rata-rata produksi minyak sebesar 391.389 barrel per hari[22]. Untuk menghitung pendapatan hasil penjualan minyak per hari, dapat dinyatakan dalam persamaan (3.7). Dengan laju produksi minyak 391.389 barrel per hari, dan harga jual minyak yang digunakan sebagai acuan adalah harga minyak mentah jenis *West Texas Intermediate* (WTI) pada 6 Mei 2019, yakni 61.30 USD/bbl, maka didapatkan nilai pendapatan sebesar 23600.783 USD/hari.

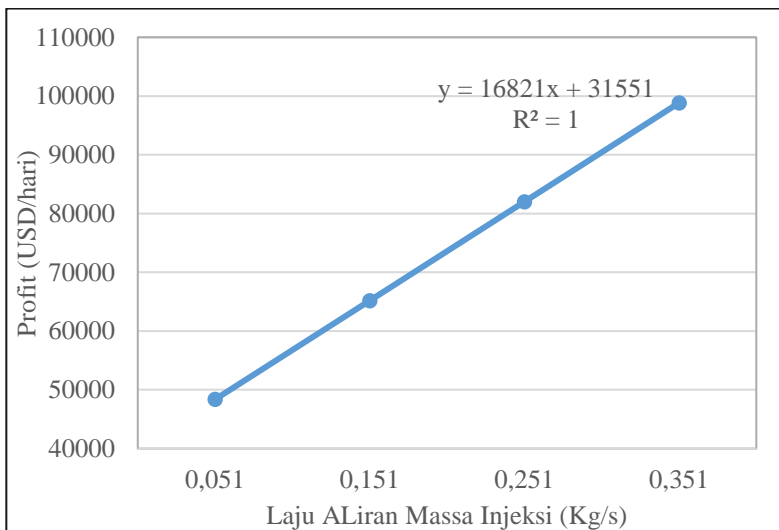
Volume bakteri dan nutrisi yang terbawa ke *production well* diasumsikan sama dengan volume bakteri dan nutrisi yang diinjeksikan pada *injection well*. Volume bakteri-nutrisi yang diinjeksikan dengan kondisi input sesuai pada Tabel 4.1 adalah masing-masing 0.051 kg/s. Biaya pembelian bakteri-nutrisi dihitung menggunakan persamaan (3.17) dan diperoleh biaya sebesar 253.955 USD/hari dengan konsentrasi awal bakteri 0.2 kg/m³ dengan harga 0.4949 USD/kg dan konsentersasi awal nutrisi 1 kg/m³ dengan harga 0.0413 USD/kg. Sedangkan biaya operasional kompresor dapat dihitung menggunakan persamaan (3.19) dan (3.30), sehingga didapatkan biaya operasional pompa sebesar 16.361 USD/hari. Perhitungan nilai profit merupakan total pendapatan dikurangi dengan biaya pengadaan bakteri-nutrisi biaya operasional pompa pada kondisi operasi parameter input sesuai dengan Tabel 4.1, dan didapatkan hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Perhitungan profit *MEOR*

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	23600.783	USD/hari
Biaya nutrisi-bakteri	253.955	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	16.361	USD/hari
Profit	23330.467	USD/hari

4.5 Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui hubungan antara variabel yang dioptimisasi dengan *objective function*. Hubungan tersebut dilihat pada pengaruh perubahan salah satu dari variabel yang dioptimisasi seperti laju aliran massa, tekanan, temperatur, konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri yang diinjeksikan terhadap estimasi nilai profit yang akan didapatkan. Pada Gambar 4.7 menampilkan grafik analisis sensitivitas dengan memberikan variasi nilai laju aliran massa injeksi antara 0.051 kg/s sampai 0.351 kg/s terhadap profit dengan tekanan, temperatur, konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri yang diinjeksikan konstan. Grafik tersebut menunjukkan peningkatan laju aliran massa injeksi *MEOR* diiringi dengan peningkatan profit.

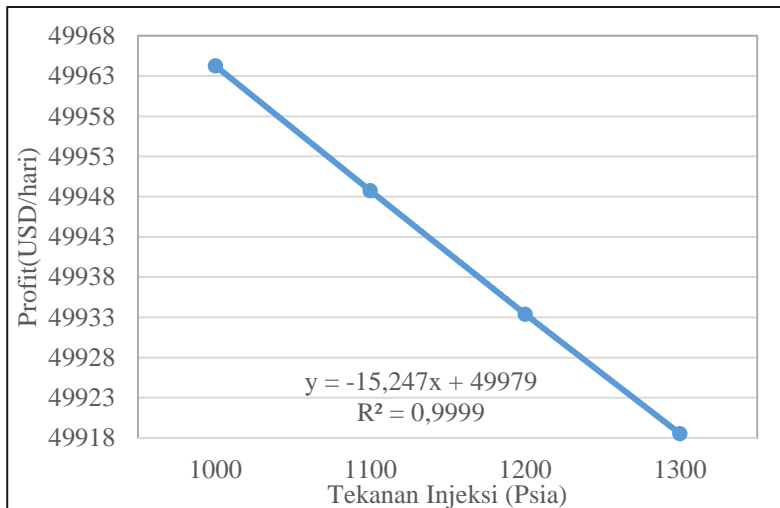


Gambar 4. 7 Grafik analisis sensitivitas perubahan laju aliran massa *MEOR* terhadap profit

Peningkatan profit pada setiap kenaikan laju aliran massa injeksi *MEOR* terjadi karena semakin banyak massa injeksi *MEOR* yang diinjeksikan maka semakin besar pula produksi biopolimer yang dihasilkan yang nantinya akan mempengaruhi penambahan

jumlah *recovery* minyak, walaupun biaya pengadaan dan biaya operasional pompa meningkat.

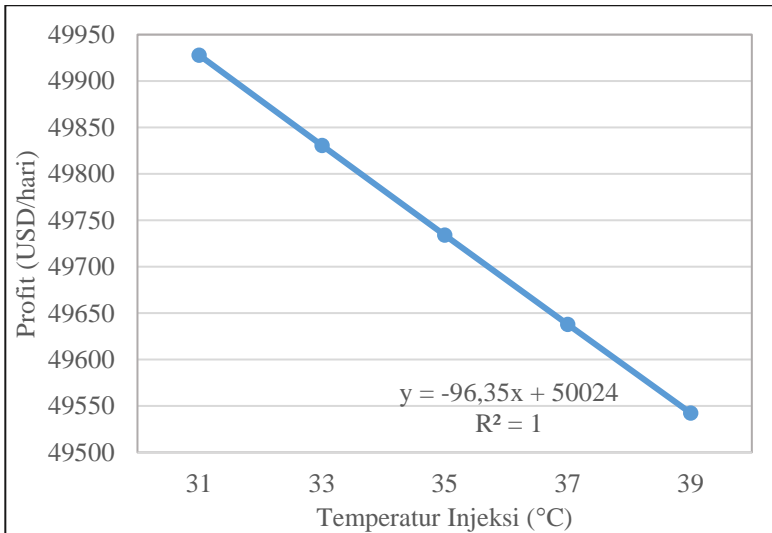
Analisis sensitivitas dengan memberikan variasi nilai tekanan injeksi *MEOR* antara 1000 psi sampai 1300 psi sebagai variabel terhadap profit dengan laju aliran massa, temperatur, konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri yang diinjeksikan memiliki nilai yang konstan ditunjukkan pada Gambar 4.8 dibawah. Pada grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan tekanan injeksi akan berpengaruh pada menurunnya profit yang didapatkan. Hal ini dikarenakan meningkatnya tekanan injeksi *MEOR* akan berdampak pada bertambahnya biaya operasional pompa sehingga dapat menurunkan nilai profit yang didapatkan. Selain itu, kenaikan tekanan injeksi juga memberikan pengaruh penurunan profit dikarenakan semakin besar tekanan yang diberikan mengakibatkan tingkat kelangsungan hidup bakteri semakin menurun.



Gambar 4. 8 Grafik analisis sensitivitas perubahan tekanan injeksi *MEOR* terhadap profit

Analisis sensitivitas selanjutnya dilakukan dengan memberikan variasi nilai masukan temperatur injeksi *MEOR*

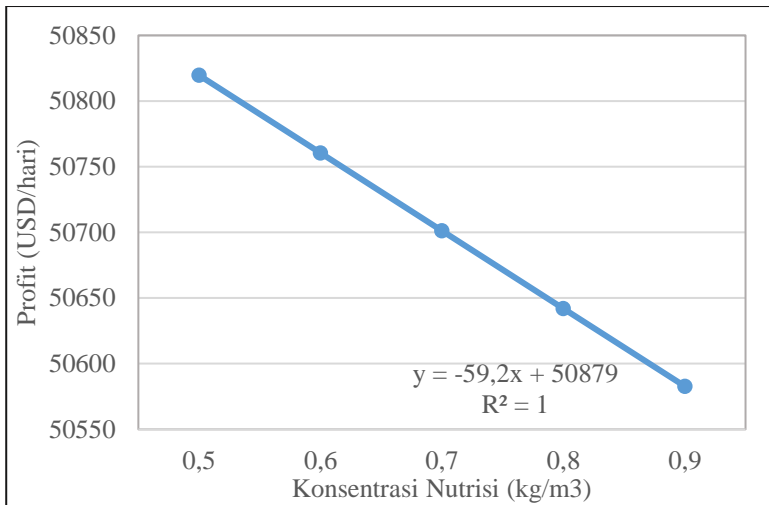
dengan rentan nilai antara 31°C hingga 40°C sebagai variabel terhadap profit dengan laju aliran massa, tekanan, konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri yang diinjeksikan konstan ditunjukkan pada Gambar 4.9 dibawah. Pada grafik tersebut terlihat bahwa kenaikan nilai temperatur injeksi akan berpengaruh pada penurunan profit yang didapatkan. Hal ini dikarenakan dengan semakin besar nilai temperatur yang diinjeksikan menyebabkan tingkat kelangsungan hidup bakteri semakin menurun yang akan mengurangi jumlah produksi biopolimer dan jumlah *recovery* minyak yang dihasilkan.



Gambar 4. 9 Grafik sensitivitas perubahan temperatur injeksi *MEOR* terhadap profit

Selanjutnya, analisis sensitivitas dilakukan dengan memberikan variasi nilai masukan pada konsentrasi injeksi nutrisi *MEOR* dengan rentan nilai antara 0.5 kg/m³ hingga 0.9 kg/m³ sebagai variabel terhadap profit dengan laju aliran massa, temperatur, tekanan dan konsentrasi injeksi bakteri tetap yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dibawah. Grafik tersebut menunjukkan bahwa kenaikan nilai dari konsentrasi injeksi nutrisi

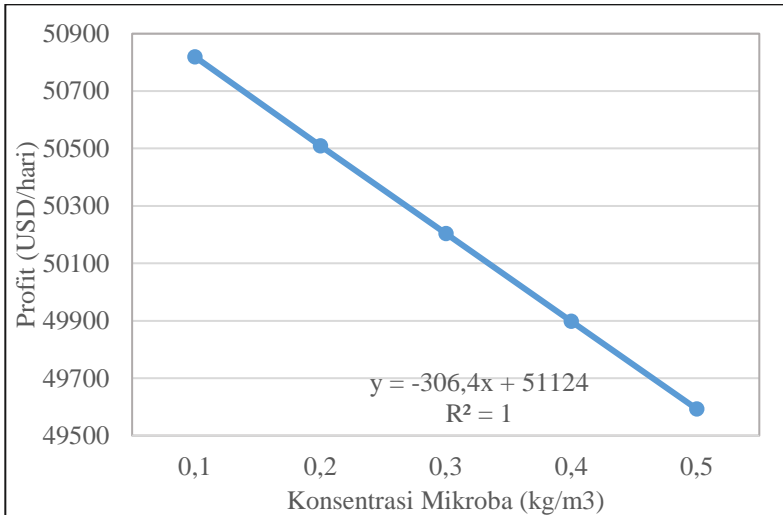
MEOR akan berpengaruh pada penurunan profit yang didapatkan. Hal ini dikarenakan dengan jumlah nutrisi yang banya menyebabkan tidak semua nutrisi dapat dicerna dengan baik oleh bakteri sehingga sisa nutrisi bercampur dengan batuan yang nantinya akan menjadi limbah. Kondisi ideal perbandingan konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri yang mampu memproduksi biopolimer secara optimal adalah 5 : 1 [8].



Gambar 4. 10 Grafik sensitivitas perubahan konsentrasi injeksi nutrisi terhadap profit

Analisis sensitivitas selanjutnya dilakukan dengan dengan memberikan variasi nilai masukan pada konsentrasi injeksi bakteri *MEOR* dengan rentan nilai antara 0.1 kg/m³ sampai 0.5 kg/m³ dengan laju aliran massa, temperatur, tekanan dan konsentrasi injeksi nutrisi yang tetap terhadap profit yang ditunjukkan pada Gambar 4.11. Grafik tersebut menunjukkan bahwa kenaikan nilai dari konsentrasi injeksi bakteri akan menurunkan profit yang didapat. Hal ini dikarenakan kurangnya pasokan nutrisi sehingga menghambat laju pertumbuhan bakteri dan berakibat pada

kematian. Selain itu, faktor biaya pengadaan bakteri yang cukup mahal.



Gambar 4. 11 Grafik sensitivitas perubahan konsentrasi injeksi bakteri terhadap profit

Dari beberapa grafik tersebut, laju aliran massa injeksi merupakan variabel optimisasi yang lebih sensitif dibandingkan dengan variabel temperatur injeksi, tekanan injeksi, konsentrasi nutrisi injeksi, dan konsentrasi bakteri injeksi karena perubahan laju aliran massa injeksi memberikan perubahan volume injeksi yang lebih banyak, semakin banyak volume injeksi maka produksi minyak akan lebih tinggi sehingga profit akan semakin meningkat.

Variabel optimisasi yang lain juga dapat memengaruhi penurunan profit seiring bertambahnya nilai dari variabel-variabel tersebut. Seperti pada tekanan injeksi, temperatur injeksi, konsentrasi nutrisi injeksi dan konsentrasi bakteri injeksi. Dibandingkan dengan temperatur, perubahan laju aliran massa menghasilkan perubahan yang signifikan terhadap laju produksi minyak. Namun, untuk mendapatkan laju aliran massa yang tinggi

diperlukan tekanan injeksi yang tinggi. Sedangkan, tekanan injeksi yang tinggi akan menurunkan profit dikarenakan menurunkan laju produksi minyak dan juga meningkatkan biaya operasi pompa. Sehingga diperlukan penentuan kombinasi variabel laju aliran massa, temperatur, tekanan, konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri yang diinjeksikan yang tepat agar profit yang diperoleh dapat maksimal. Dengan menggunakan teknik optimisasi dengan metode stokastik akan diperoleh nilai variabel-variabel yang optimum.

4.6 Optimisasi Biopolimer *MEOR*

Fungsi objektif dari optimisasi ini adalah profit, yang merupakan jumlah dari pendapatan dari penjualan minyak dikurangi biaya pembelian bakteri *Bacillus lichenformis* dan nutrisi berupa *mollase* dan biaya operasional pompa. Variabel yang dioptimisasi adalah laju aliran massa injeksi, tekanan injeksi, temperatur injeksi, konsentrasi bakteri dan konsentrasi nutrisi. Teknik optimisasi *stochastics algorithms* yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah GA dan DA. Berdasarkan hasil optimisasi diperoleh hasil terbaik dari setiap jenis teknik optimisasi dapat dilihat pada Tabel 4.4 untuk hasil variabel yang yang dioptimisasi.

Hasil perhitungan pendapatan, biaya pengadaan bakteri *Bacillus lichenformis* dan nutrisi berupa *mollase*, biaya operasional pompa dan profit pada setiap teknik optimisasi berdasarkan hasil variabel yang dioptimisasi dapat dilihat pada tabel 4.5 dan 4.6.

Tabel 4. 4 Variabel-variabel optimal pada kondisi operasi *MEOR*

Variabel yang dioptimasi	Teknik Optimisasi	
	GA	DA
Konsentrasi <i>B.lichenformis</i>	0.1002	0.1002
Konsentrasi <i>Mollase</i>	0.5000	0.5006
Laju Aliran Massa <i>MEOR</i>	0.0540	0.0540
Tekanan Injeksi <i>MEOR</i>	1087.0000	1087.0023
Temperatur Injeksi <i>MEOR</i>	31.0000	32.8878

Tabel 4. 5 Perhitungan profit *MEOR* setelah dioptimisasi menggunakan GA

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	44142.866	USD/hari
Biaya Bakteri dan Nutrisi	127.146	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	17.324	USD/hari
Net Profit	43998.396	USD/hari

Tabel 4. 6 Perhitungan profit *MEOR* setelah dioptimisasi menggunakan DA

Parameter	Nilai	Satuan
Pendapatan	44109.544	USD/hari
Biaya Bakteri dan Nutrisi	127.154	USD/hari
Biaya Operasional Pompa	17.313	USD/hari
Net Profit	43965.076	USD/hari

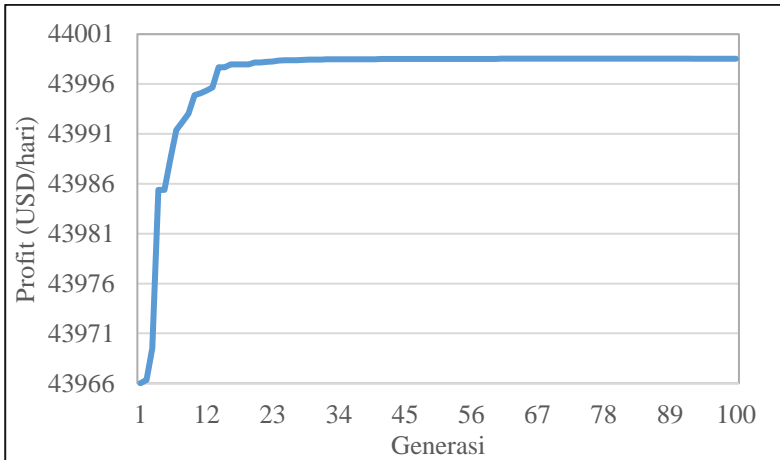
Hasil variabel yang telah dioptimisasi tersebut kemudian dibandingkan pada teknik optimisasi menggunakan GA dan DA untuk mengetahui teknik optimisasi yang dapat memperoleh hasil paling maksimum terhadap nilai profit. Tabel 4.7 menunjukkan hasil nilai profit dari *MEOR* setelah dioptimisasi dengan dua jenis teknik optimisasi tersebut.

Tabel 4. 7 Hasil profit *MEOR* setelah dioptimisasi

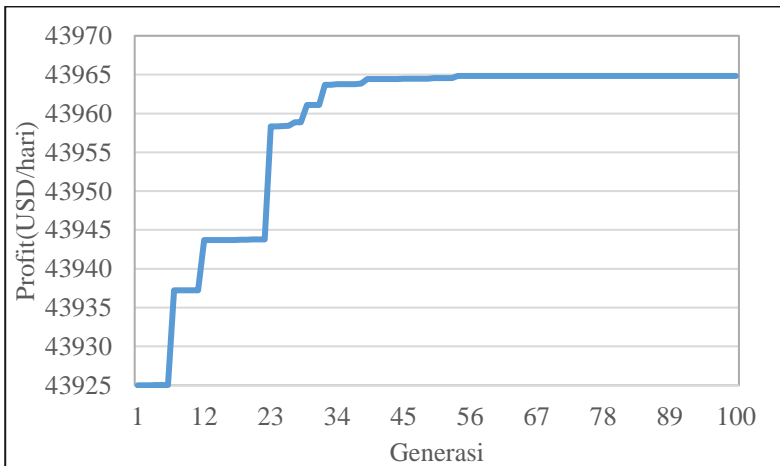
Teknik Optimisasi	Profit	Satuan	Peningkatan (%)
GA	43998.396	USD/hari	88.6
DA	43965.076	USD/hari	88.4

Berdasarkan hasil profit dari kedua jenis teknik optimisasi diperoleh hasil optimisasi terbaik dari teknik optimisasi GA dengan hasil plot *fitness* terbaik setiap generasi pada proses optimisasi GA ditunjukkan pada Gambar 4.11 sedangkan hasil plot *fitness* terbaik setiap generasi pada proses optimisasi DA ditunjukkan pada Gambar 4.12. Proses optimisasi GA menghasilkan nilai profit sebesar 43998.396 USD/hari atau

mengalami peningkatan profit dibandingkan sebelum dilakukan optimisasi sebesar 88.6%, sedangkan optimisasi dengan DA menghasilkan nilai profit yang lebih rendah dibandingkan dengan GA dengan peningkatan 88.4%.

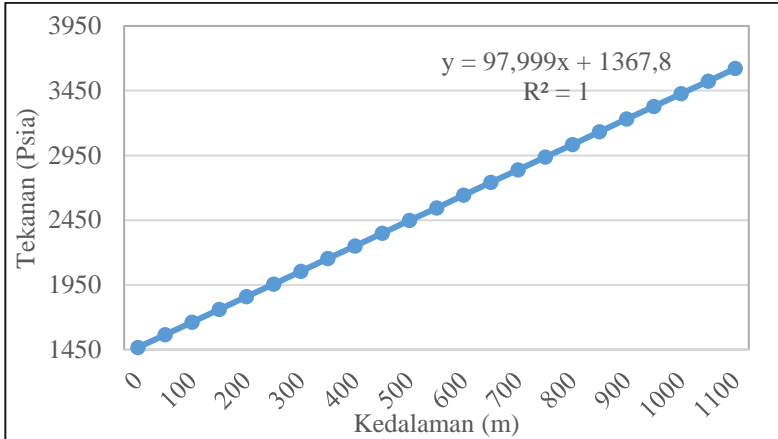


Gambar 4. 12 Plot fitness terbaik setiap generasi GA

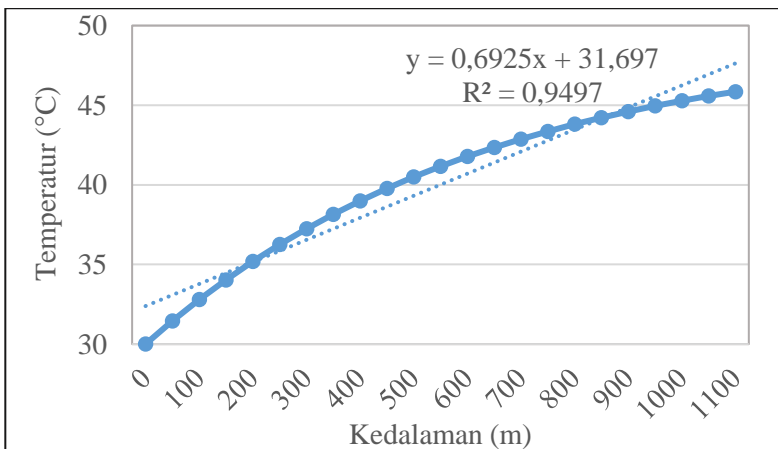


Gambar 4. 13 Plot fitness terbaik setiap generasi DA

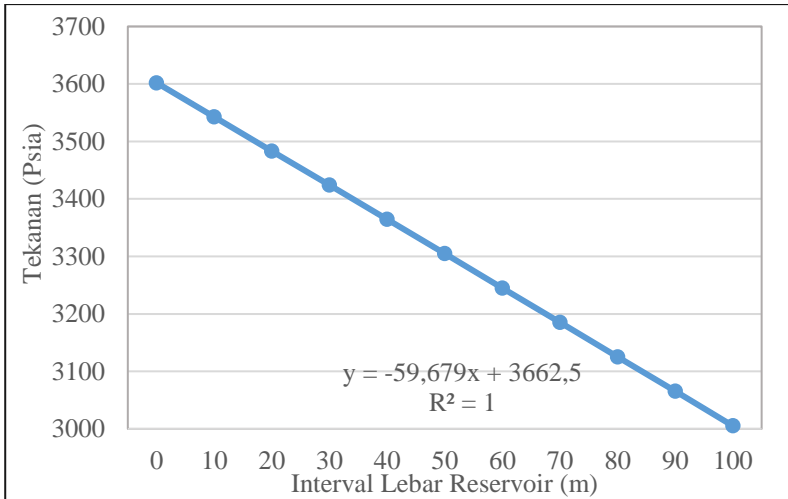
Dengan parameter input sesuai dengan Tabel 4.4 untuk hasil optimisasi GA, maka plot grafik tekanan dan temperatur biopolimer *MEOR* pada *injection* hingga *production well* ditunjukkan pada Gambar 4.14 hingga 4.19.



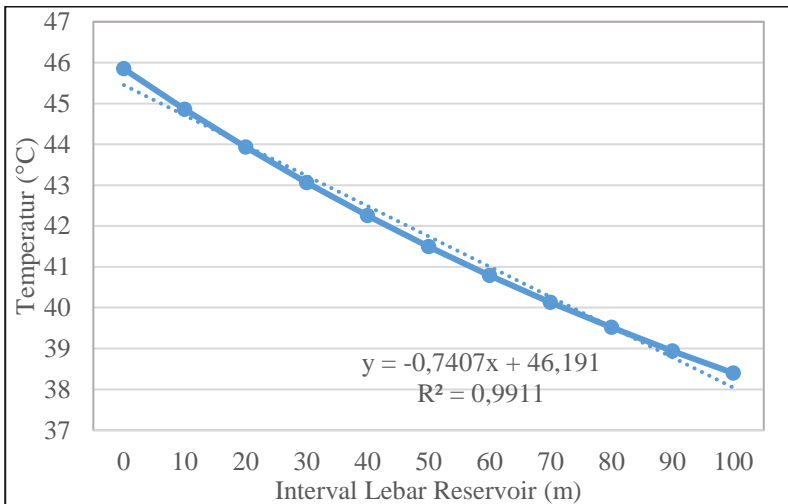
Gambar 4. 14 Grafik tekanan injeksi *MEOR* terhadap kedalaman pada *injection well* setelah optimisasi



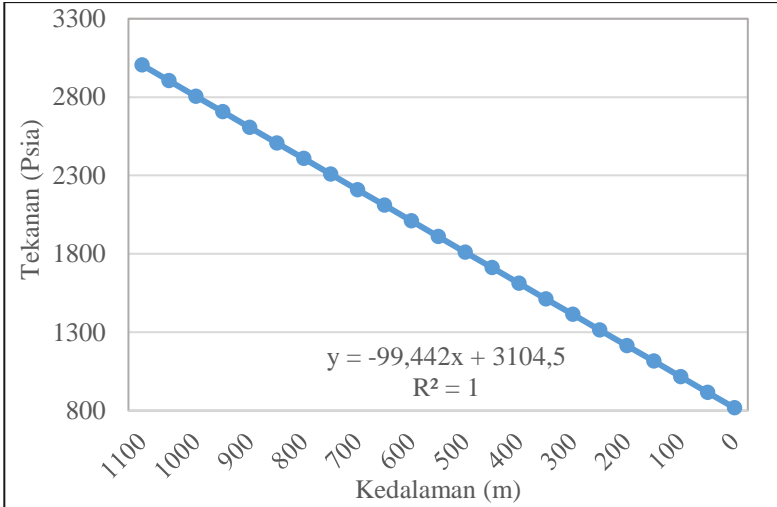
Gambar 4.15 Grafik temperatur injeksi *MEOR* terhadap kedalaman pada *injection well* setelah optimisasi



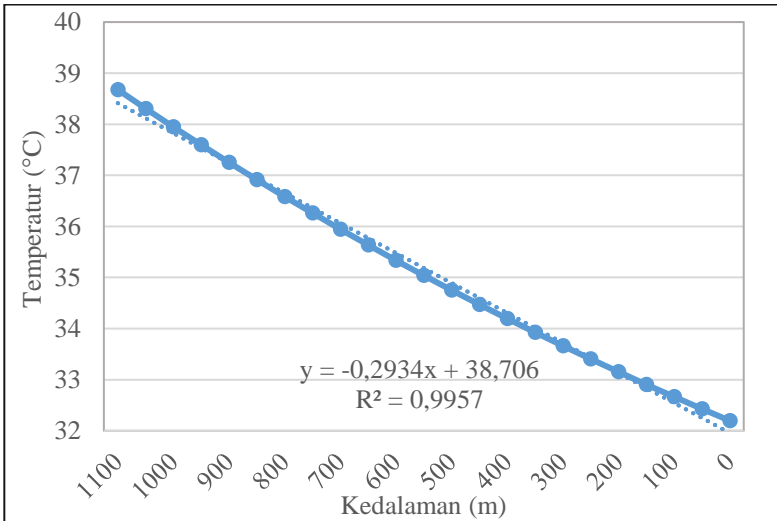
Gambar 4. 16 Grafik tekanan *MEOR* terhadap kedalaman pada *reservoir* setelah dilakukan optimisasi



Gambar 4. 17 Grafik temperatur *MEOR* terhadap kedalaman pada *injection well* setelah dilakukan optimisasi



Gambar 4. 18 Grafik tekanan MEOR pada *production well* setelah dilakukan optimisasi



Gambar 4. 19 Grafik temperatur MEOR pada *production well* setelah dilakukan optimisasi

Dari penjelasan grafik diatas dapat dilihat bahwa *pressure drop* yang dihasilkan pada *injection well*, *reservoir* dan *production well* setelah dilakukan optimisasi mengalami peningkatan jika dibandingkan dengan gambar grafik 4.1 hingga 4.6. Hal ini terjadi dikarenakan setelah dilakukan optimisasi terdapat perbedaan nilai laju massa yang lebih besar yaitu dari $0,051 \text{ kg/m}^3$ menjadi $0,054 \text{ kg/m}^3$. Nilai tersebut berdampak pada peningkatan laju volumetrik dan mempengaruhi besar *pressure drop* yang dihasilkan. Sedangkan perubahan temperatur pada *injection well*, *reservoir* dan *production well* tidak terjadi perubahan dikarenakan temperatur injeksi sebelum dan sesudah dilakukan optimisasi memiliki nilai yang sama yaitu 31°C

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Produksi polimer pada *MEOR* dapat dimodelkan dengan baik dengan membagi menjadi tiga bagian yaitu *injection-production well* (metode Begg's-Brill); dan *reservoir* (persamaan Darcy). Pada *injection well* dan *production well* dengan menggunakan persamaan Begg's-Brill menunjukkan rata-rata perbedaan 0.203% dan 0.564% untuk tekanan dan rata-rata perbedaan 3.578% dan 1.297% untuk temperatur dibandingkan dengan simulasi *software* PIPESIM. Pada *reservoir* dengan menggunakan persamaan darcy didapatkan rata-rata perbedaan 0.782% untuk tekanan dan rata-rata perbedaan 0.115% untuk temperatur jika dibandingkan dengan *software* COMSOL *Multiphysics*.
2. Berdasarkan analisis sensitivitas, nilai profit pada kondisi operasi biopolimer *MEOR* dipengaruhi oleh laju aliran massa, tekanan, temperatur, konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri yang diinjeksikan. Pada injeksi *MEOR*, profit akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya laju aliran massa dan profit akan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya tekanan, temperatur, konsentrasi nutrisi dan konsentrasi bakteri. Hasil optimisasi menggunakan *Stochastic Algorithms* yang terdiri dari dua jenis teknik optimisasi nilai maksimum diperoleh hasil terbaik dari *Genetic Algorithm* dengan mengoptimalkan kondisi operasi biopolimer *MEOR* hingga 88.6% dimana profit dapat dioptimisasi dari 23330.467 USD/hari menjadi 43998.396 USD/hari.

5.2 Saran

Hal yang dapat penulis sarankan dalam penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan penelitian *MEOR* dengan mempertimbangkan jenis bakteri yang mampu memproduksi metabolit lebih baik.
2. Menggunakan karakteristik (*properties*) fluida yang sesuai dengan kondisi sesungguhnya agar hasil pemodelan dapat lebih akurat.
3. melakukan pengembangan penelitian dengan sudut pandang ilmu mikrobiologi untuk mengetahui perkembangan bakteri dalam memproduksi metabolit.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. ESDM, “Supply Demand Energi,” *Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian ESDM*, Jakarta, 2013.
- [2] M. S. A. Perera, R. P. Gamage, T. D. Rathnaweera, A. S. Ranathunga, A. Koay, and X. Choi, “A Review of CO₂-Enhanced oil recovery with a simulated sensitivity analysis,” *Energies*, vol. 9, no. 7, 2016.
- [3] W. R. Finnerty and M. E. Singer, *Microbial enhanced oil recovery Microbial enhanced oil recovery*, no. 5. 1983.
- [4] Hozumi, “Produksi Gas Hasil Biodegradasi Minyak Bumi : Kajian Awal Aplikasinya Dalam Microbial Enhanced Oil Recovery (Meor),” vol. 13, no. 2, pp. 111–116, 2009.
- [5] P. Alikhani, S. M. Hesami, and A. Hashemi, “Prediction of Microbial Enhanced Oil Recovery using an Artificial Intelligence Method based on Experimental Data,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 103, no. 15, pp. 975–8887, 2014.
- [6] A. A. Olajire, “Review of ASP EOR (alkaline surfactant polymer enhanced oil recovery) technology in the petroleum industry: Prospects and challenges,” *Energy*, vol. 77, pp. 963–982, 2014.
- [7] Australia Sino oil and gas pty limited, “An Introduction to Enhanced Oil Recovery Techniques,” 2013.
- [8] A. Amundsen, S. Marie Nielsen, and X. Raynaud, “Microbial Enhanced Oil Recovery: Modeling and Numerical Simulations,” no. July, 2015.
- [9] R. Genc, “Production of a Biopolymer at Reactor Scale : A Laboratory Experience,” pp. 1175–1177, 2011.
- [10] R. B. Needham, P. P. Co, P. H. Doe, and P. P. Co, “Polymer Flooding Review,” no. December, pp. 1503–1507, 1987.
- [11] A. Mandal, “Chemical flood enhanced oil recovery : a review,” vol. 9, no. 3, 2015.
- [12] E. C. M. S. Lacerda, V. I. Priimenko, N. Fluminense, and P. Adolfo, “Microbial EOR : A Quantitative Prediction of Recovery Factor,” *Engineering*, 2012.

- [13] “Beggs and Brill 1973.” .
- [14] L.P. Dake, *Fundamentals of Reservoir Engineering*, 1st Editio. 1983.
- [15] K. Avila, D. Moxey, A. De Lozar, M. Avila, D. Barkley, and B. Hof, “Supporting Online Material for The onset of turbulence in pipe flow,” vol. 192, no. July, 2011.
- [16] O. B. A, “TOWARDS MODELING HEAT TRANSFER USING A LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR POROUS MEDIA,” The School of Graduate Studies Laurentian, 2014.
- [17] E. C. Donaldson, “Petrophysics.”
- [18] H. Gu *et al.*, “Steam injection for heavy oil recovery: Modeling of wellbore heat efficiency and analysis of steam injection performance,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 97, pp. 166–177, 2015.
- [19] P. Incropera and Et.al, *Fundamentals of Heat and Mass Transfers*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [20] C. G. Gutiérrez-Arriaga, M. Serna-González, J. M. Ponce-Ortega, and M. M. El-Halwagi, “Multi-objective optimization of steam power plants for sustainable generation of electricity,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 15, no. 4, pp. 551–566, 2013.
- [21] T. R. Biyanto *et al.*, “Duelist algorithm: An algorithm inspired by how duelist improve their capabilities in a duel,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 9712 LNCS, pp. 39–47, 2016.
- [22] I. Fukai, S. Mishra, and M. A. Moody, “International Journal of Greenhouse Gas Control Economic analysis of CO₂ -enhanced oil recovery in Ohio : Implications for carbon capture , utilization , and storage in the Appalachian Basin region,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 52, pp. 357–377, 2016.
- [23] “Enhanced Oil Recovery Potential in the United States January 1978 NTIS order #PB-276594,” no. January, 1978.
- [24] T. R. Biyanto, H. Y. Fibrianto, and M. Ramasamy,

“Thermal and hydraulic impacts consideration in refinery crude preheat train cleaning scheduling using recent stochastic optimization methods,” *Appl. Therm. Eng.*, no. June 2016, 2017.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

LAMPIRAN A Validasi Pemodelan Temperatur dan Tekanan pada *Injection Well*

Validasi model pada *injection well* dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan hasil simulasi pada perangkat lunak PIPESIM. Pada Tabel A1, nilai laju aliran massa injeksi *MEOR* divariasikan, tekanan dan temperatur injeksi yang tetap. Nilai variasi berada diantara nilai 0.051 hingga 0.054 kg/s.

Tabel A 1 Validasi model *injection well* dengan variasi laju aliran massa injeksi

m kg/s	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	T out	P	T
0,051	0	1085,000	30,543	1087,000	31,000	0,184	1,496
0,051	50	1182,133	31,536	1184,132	32,459	0,169	2,927
0,051	100	1279,260	32,954	1281,259	33,805	0,156	2,583
0,051	150	1376,380	34,261	1378,378	35,046	0,145	2,291
0,051	200	1473,491	35,466	1475,488	36,189	0,136	2,039
0,051	250	1570,591	36,576	1572,587	37,242	0,127	1,821
0,051	300	1667,677	37,597	1669,673	38,210	0,120	1,631
0,051	350	1764,749	38,537	1766,744	39,101	0,113	1,464
0,051	400	1861,805	39,402	1863,799	39,921	0,107	1,317
0,051	450	1958,843	40,197	1960,837	40,674	0,102	1,187
0,051	500	2055,862	40,928	2057,856	41,367	0,097	1,071
0,051	550	2152,862	41,600	2154,854	42,003	0,093	0,968
0,051	600	2249,841	42,217	2251,832	42,587	0,089	0,876
0,051	650	2346,797	42,783	2348,788	43,123	0,085	0,794
0,051	700	2443,731	43,303	2445,721	43,615	0,081	0,720
0,051	750	2540,641	43,780	2542,631	44,066	0,078	0,653
0,051	800	2637,526	44,218	2639,515	44,480	0,075	0,593
0,051	850	2734,387	44,620	2736,375	44,860	0,073	0,539
0,051	900	2831,221	44,988	2833,209	45,209	0,070	0,490
0,051	950	2928,029	45,326	2930,016	45,528	0,068	0,446
0,051	1000	3024,810	45,635	3026,796	45,821	0,066	0,406
0,051	1050	3121,563	45,919	3123,549	46,089	0,064	0,370
0,051	1100	3218,289	46,179	3220,274	46,335	0,062	0,337

Tabel A.1 (lanjutan)

m	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
kg/s	m	P out	T out	P out	T out	P	T
0,052	0	1085,00	30,00	1087,00	31,00	0,18	3,33
0,052	50	1182,13	31,54	1184,13	32,37	0,17	2,63
0,052	100	1279,26	32,95	1281,26	33,63	0,16	2,06
0,052	150	1376,38	34,26	1378,38	34,80	0,15	1,59
0,052	200	1473,49	35,46	1475,49	35,89	0,14	1,20
0,052	250	1570,59	36,57	1572,59	36,90	0,13	0,88
0,052	300	1667,68	37,60	1669,67	37,83	0,12	0,62
0,052	350	1764,75	38,54	1766,75	38,69	0,11	0,40
0,052	400	1861,81	39,40	1863,80	39,49	0,11	0,22
0,052	450	1958,85	40,20	1960,84	40,23	0,10	0,08
0,052	500	2055,87	40,93	2057,86	40,91	0,10	0,04
0,052	550	2152,87	41,60	2154,86	41,54	0,09	0,14
0,052	600	2249,84	42,22	2251,84	42,12	0,09	0,22
0,052	650	2346,80	42,78	2348,79	42,66	0,08	0,28
0,052	700	2443,73	43,30	2445,73	43,16	0,08	0,33
0,052	750	2540,65	43,78	2542,63	43,62	0,08	0,37
0,052	800	2637,53	44,22	2639,52	44,04	0,08	0,40
0,052	850	2734,39	44,62	2736,38	44,43	0,07	0,42
0,052	900	2831,23	44,99	2833,21	44,79	0,07	0,43
0,052	950	2928,03	45,32	2930,02	45,13	0,07	0,44
0,052	1000	3024,82	45,63	3026,80	45,43	0,07	0,44
0,052	1050	3121,57	45,92	3123,56	45,72	0,06	0,44
0,052	1100	3218,30	46,18	3220,28	45,98	0,06	0,43
0,053	0	1085,00	30,92	1087,00	31,00	0,18	0,26
0,053	50	1182,13	31,64	1184,13	32,35	0,17	2,26
0,053	100	1279,26	32,31	1281,26	33,61	0,16	4,00
0,053	150	1376,38	33,02	1378,38	34,77	0,15	5,30
0,053	200	1473,49	33,74	1475,49	35,85	0,14	6,24
0,053	250	1570,59	34,48	1572,59	36,85	0,13	6,88
0,053	300	1667,68	35,22	1669,68	37,77	0,12	7,26
0,053	350	1764,75	35,96	1766,75	38,63	0,11	7,43
0,053	400	1861,81	36,71	1863,80	39,43	0,11	7,40
0,053	450	1958,85	37,46	1960,84	40,16	0,10	7,22
0,053	500	2055,87	38,21	2057,86	40,84	0,10	6,90

Tabel A.1 (lanjutan)

m	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
kg/s	m	P out	T out	P out	T out	P	T
0,053	550	2152,87	38,96	2154,86	41,47	0,09	6,46
0,053	600	2249,85	39,71	2251,84	42,05	0,09	5,91
0,053	650	2346,80	40,46	2348,80	42,59	0,08	5,27
0,053	700	2443,74	41,21	2445,73	43,09	0,08	4,55
0,053	750	2540,65	41,97	2542,64	43,55	0,08	3,77
0,053	800	2637,54	42,72	2639,52	43,98	0,08	2,94
0,053	850	2734,40	43,47	2736,38	44,37	0,07	2,06
0,053	900	2831,23	44,22	2833,22	44,73	0,07	1,15
0,053	950	2928,04	44,98	2930,03	45,07	0,07	0,20
0,053	1000	3024,82	45,73	3026,81	45,38	0,07	0,77
0,053	1050	3121,58	46,48	3123,56	45,66	0,06	1,76
0,053	1100	3218,30	47,23	3220,29	45,92	0,06	2,77
0,054	0	1085,00	30,78	1087,00	31,00	0,18	0,71
0,054	50	1182,13	31,57	1184,13	32,34	0,17	2,44
0,054	100	1279,26	32,19	1281,26	33,58	0,16	4,31
0,054	150	1376,38	32,86	1378,38	34,74	0,15	5,72
0,054	200	1473,49	33,55	1475,49	35,81	0,14	6,73
0,054	250	1570,60	34,26	1572,59	36,80	0,13	7,41
0,054	300	1667,68	34,99	1669,68	37,72	0,12	7,82
0,054	350	1764,76	35,72	1766,75	38,57	0,11	8,00
0,054	400	1861,81	36,46	1863,81	39,37	0,11	7,98
0,054	450	1958,85	37,20	1960,84	40,10	0,10	7,79
0,054	500	2055,87	37,94	2057,86	40,78	0,10	7,47
0,054	550	2152,87	38,69	2154,86	41,41	0,09	7,02
0,054	600	2249,85	39,44	2251,84	41,99	0,09	6,47
0,054	650	2346,81	40,19	2348,80	42,53	0,08	5,82
0,054	700	2443,74	40,95	2445,73	43,03	0,08	5,09
0,054	750	2540,65	41,70	2542,64	43,49	0,08	4,29
0,054	800	2637,54	42,45	2639,53	43,92	0,08	3,45
0,054	850	2734,40	43,20	2736,39	44,31	0,07	2,56
0,054	900	2831,24	43,96	2833,22	44,67	0,07	1,63
0,054	950	2928,05	44,71	2930,03	45,01	0,07	0,68
0,054	1000	3024,83	45,46	3026,81	45,32	0,07	0,30
0,054	1050	3121,58	46,21	3123,57	45,61	0,06	1,30

Tabel A.1 (lanjutan)

m	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
kg/s	m	P out	T out	P out	T out	P	T
0,054	1100	3218,31	46,97	3220,29	45,87	0,06	2,32
AVERAGE						0,10	4,67

Pada tabel A.2 divariasikan nilai tekanan injeksi *MEOR* dengan penambahan sebesar 100 psia dari keadaan awal 1000 psia dengan kondisi temperatur dan laju aliran massa injeksi yang konstan. Didapatkan rata-rata *error* tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,132% dan 3,619%

Tabel A. 2 Validasi model *injection well* dengan variasi tekanan

P	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
psia	m	P out	T out	P out	T out	P	T
1000	0	998,00	30,67	1000,00	31,00	0,20	1,06
1000	50	1095,16	31,87	1097,16	32,38	0,18	1,60
1000	100	1192,32	32,68	1194,32	33,66	0,17	3,00
1000	150	1289,47	33,46	1291,47	34,84	0,15	4,14
1000	200	1386,61	34,22	1388,61	35,94	0,14	5,00
1000	250	1483,74	34,98	1485,74	36,95	0,13	5,62
1000	300	1580,86	35,74	1582,85	37,89	0,13	6,02
1000	350	1677,96	36,49	1679,95	38,75	0,12	6,21
1000	400	1775,04	37,24	1777,04	39,56	0,11	6,21
1000	450	1872,11	37,99	1874,10	40,30	0,11	6,06
1000	500	1969,16	38,74	1971,15	40,98	0,10	5,77
1000	550	2066,19	39,49	2068,18	41,61	0,10	5,36
1000	600	2163,20	40,25	2165,19	42,19	0,09	4,84
1000	650	2260,18	41,00	2262,17	42,73	0,09	4,22
1000	700	2357,15	41,75	2359,14	43,23	0,08	3,53
1000	750	2454,09	42,51	2456,08	43,69	0,08	2,78
1000	800	2551,00	43,26	2552,99	44,11	0,08	1,97
1000	850	2647,89	44,01	2649,88	44,50	0,08	1,12
1000	900	2744,75	44,76	2746,74	44,86	0,07	0,22
1000	950	2841,59	45,51	2843,58	45,19	0,07	0,70
1000	1000	2938,40	46,26	2940,39	45,49	0,07	1,66

Tabel A. 2 (lanjutan)

P psia	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	T out	P	T
1000	1050	3035,19	47,01	3037,17	45,77	0,07	2,64
1000	1100	3131,94	47,77	3133,93	46,03	0,06	3,63
1100	0	1098,00	31,00	1100,00	31,000	0,18	0,00
1100	50	1195,13	32,46	1197,13	32,381	0,17	0,24
1100	100	1292,25	33,81	1294,25	33,661	0,15	0,44
1100	150	1389,37	35,05	1391,36	34,846	0,14	0,58
1100	200	1486,47	36,19	1488,47	35,943	0,13	0,68
1100	250	1583,57	37,24	1585,56	36,957	0,13	0,76
1100	300	1680,65	38,21	1682,65	37,895	0,12	0,82
1100	350	1777,72	39,10	1779,71	38,763	0,11	0,86
1100	400	1874,77	39,92	1876,76	39,564	0,11	0,89
1100	450	1971,80	40,67	1973,80	40,305	0,10	0,90
1100	500	2068,82	41,37	2070,81	40,989	0,10	0,92
1100	550	2165,81	42,00	2167,81	41,621	0,09	0,90
1100	600	2262,79	42,59	2264,78	42,204	0,09	0,91
1100	650	2359,74	43,12	2361,73	42,742	0,08	0,88
1100	700	2456,67	43,62	2458,66	43,238	0,08	0,88
1100	750	2553,57	44,07	2555,56	43,696	0,08	0,85
1100	800	2650,46	44,48	2652,44	44,118	0,07	0,81
1100	850	2747,31	44,86	2749,30	44,865	0,07	0,01
1100	900	2844,14	45,21	2846,13	45,196	0,07	0,03
1100	950	2940,94	45,53	2942,93	45,500	0,07	0,07
1100	1000	3037,72	45,82	3039,71	45,781	0,07	0,09
1100	1050	3134,47	46,09	3136,46	46,039	0,06	0,11
1100	1100	3231,19	46,33	3233,18	31,000	0,06	3,09
1200	0	1198,45	30,50	1200,00	31,00	0,13	1,64
1200	50	1295,53	32,00	1297,09	32,46	0,12	1,44
1200	100	1392,61	33,38	1394,18	33,81	0,11	1,29
1200	150	1489,69	34,66	1491,26	35,05	0,11	1,13
1200	200	1586,75	35,83	1588,33	36,19	0,10	1,00
1200	250	1683,81	36,91	1685,39	37,24	0,09	0,89
1200	300	1780,85	37,91	1782,44	38,21	0,09	0,79
1200	350	1877,87	38,82	1879,47	39,10	0,09	0,72
1200	400	1974,89	39,67	1976,49	39,92	0,08	0,63

Tabel A. 2 (lanjutan)

P	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	P out	T out	P out
1200	450	2071,88	40,44	2073,49	40,68	0,08	0,59
1200	500	2168,86	41,15	2170,47	41,37	0,07	0,53
1200	550	2265,81	41,81	2267,43	42,01	0,07	0,48
1200	600	2362,75	42,41	2364,37	42,59	0,07	0,42
1200	650	2459,66	42,96	2461,29	43,13	0,07	0,40
1200	700	2556,56	43,46	2558,18	43,62	0,06	0,37
1200	750	2653,42	43,93	2655,05	44,07	0,06	0,32
1200	800	2750,27	44,35	2751,90	44,48	0,06	0,29
1200	850	2847,09	44,74	2848,72	44,86	0,06	0,27
1200	900	2943,88	45,10	2945,52	45,21	0,06	0,24
1200	950	3040,65	45,43	3042,28	45,53	0,05	0,22
1200	1000	3137,39	45,73	3139,03	45,82	0,05	0,20
1200	1050	3234,10	46,01	3235,74	46,09	0,05	0,17
1200	1100	3330,79	46,26	3332,43	46,34	0,05	0,17
1300	0	1298,34	30,67	1300,00	31,00	0,128	1,076
1300	50	1395,39	32,16	1397,06	32,46	0,120	0,933
1300	100	1492,44	33,53	1494,11	33,81	0,112	0,835
1300	150	1589,48	34,79	1591,16	35,05	0,106	0,747
1300	200	1686,52	35,95	1688,20	36,19	0,100	0,668
1300	250	1783,54	37,03	1785,22	37,25	0,094	0,594
1300	300	1880,55	38,01	1882,24	38,21	0,090	0,526
1300	350	1977,54	38,92	1979,23	39,11	0,085	0,488
1300	400	2074,52	39,76	2076,22	39,93	0,082	0,428
1300	450	2171,48	40,52	2173,18	40,68	0,078	0,395
1300	500	2268,43	41,23	2270,13	41,37	0,075	0,340
1300	550	2365,35	41,88	2367,05	42,01	0,072	0,310
1300	600	2462,26	42,47	2463,96	42,59	0,069	0,283
1300	650	2559,14	43,02	2560,84	43,13	0,066	0,256
1300	700	2656,00	43,52	2657,70	43,62	0,064	0,230
1300	750	2752,83	43,98	2754,54	44,07	0,062	0,205
1300	800	2849,64	44,40	2851,35	44,48	0,060	0,180
1300	850	2946,43	44,79	2948,14	44,86	0,058	0,156
1300	900	3043,19	45,14	3044,90	45,21	0,056	0,155
1300	950	3139,92	45,47	3141,64	45,53	0,055	0,132

Tabel A. 2 (lanjutan)

P psia	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	P out	T out	P out
1300	1000	3236,63	45,76	3238,34	45,82	0,053	0,131
1300	1050	3333,31	46,04	3335,02	46,09	0,051	0,109
1300	1100	3429,96	46,29	3431,68	46,34	0,050	0,108
Average						0,132	3,619

Pada tabel A.3, divariasikan nilai temperatur injeksi MEOR dengan kenaikan sebesar 3°C dari keadaan awal 31°C. Kondisi laju aliran massa dan tekanan injeksi konstan. Didapatkan rata-rata *error* model gradien tekanan dan temperatur adalah masing-masing sebesar 0,050 % dan 1,099%.

Tabel A. 3 Validasi model *injection well* dengan variasi temperatur

T C	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
31	0	1086,10	30,54	1087,00	31,00	0,083	1,506
31	50	1183,22	32,04	1184,13	32,46	0,077	1,311
31	100	1280,34	33,41	1281,26	33,81	0,072	1,197
31	150	1377,45	34,69	1378,38	35,05	0,068	1,038
31	200	1474,56	35,86	1475,49	36,19	0,063	0,920
31	250	1571,65	36,94	1572,59	37,24	0,060	0,812
31	300	1668,73	37,93	1669,67	38,21	0,056	0,738
31	350	1765,80	38,84	1766,74	39,10	0,053	0,669
31	400	1862,85	39,68	1863,80	39,92	0,051	0,605
31	450	1959,88	40,46	1960,84	40,67	0,049	0,519
31	500	2056,90	41,17	2057,86	41,37	0,047	0,486
31	550	2153,89	41,82	2154,85	42,00	0,045	0,430
31	600	2250,87	42,42	2251,83	42,59	0,043	0,401
31	650	2347,82	42,97	2348,79	43,12	0,041	0,349
31	700	2444,75	43,47	2445,72	43,61	0,040	0,322
31	750	2541,66	43,94	2542,63	44,07	0,038	0,296
31	800	2638,54	44,36	2639,52	44,48	0,037	0,271
31	850	2735,40	44,75	2736,38	44,86	0,036	0,246

Tabel A. 3 (lanjutan)

T	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
C	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
31	900	2832,23	45,11	2833,21	45,21	0,035	0,222
31	950	2929,03	45,44	2930,02	45,53	0,034	0,198
31	1000	3025,81	45,74	3026,80	45,82	0,033	0,175
31	1050	3122,56	46,01	3123,55	46,09	0,032	0,174
31	1100	3219,29	46,26	3220,27	46,33	0,030	0,151
33	0	1086,23	32,71	1087,00	33,00	0,071	0,887
33	50	1183,40	34,04	1184,17	34,30	0,065	0,764
33	100	1280,55	35,26	1281,33	35,50	0,061	0,681
33	150	1377,70	36,38	1378,48	36,61	0,057	0,632
33	200	1474,84	37,42	1475,62	37,63	0,053	0,561
33	250	1571,96	38,37	1572,75	38,56	0,050	0,495
33	300	1669,07	39,25	1669,86	39,43	0,047	0,459
33	350	1766,16	40,06	1766,96	40,22	0,045	0,399
33	400	1863,23	40,80	1864,03	40,95	0,043	0,368
33	450	1960,29	41,48	1961,09	41,62	0,041	0,338
33	500	2057,32	42,11	2058,13	42,23	0,039	0,285
33	550	2154,33	42,68	2155,14	42,80	0,038	0,281
33	600	2251,33	43,21	2252,14	43,32	0,036	0,255
33	650	2348,29	43,70	2349,11	43,79	0,035	0,206
33	700	2445,24	44,14	2446,05	44,23	0,033	0,204
33	750	2542,16	44,55	2542,97	44,63	0,032	0,180
33	800	2639,05	44,92	2639,87	45,00	0,031	0,178
33	850	2735,92	45,27	2736,74	45,33	0,030	0,133
33	900	2832,76	45,58	2833,58	45,64	0,029	0,132
33	950	2929,58	45,87	2930,40	45,93	0,028	0,131
33	1000	3026,36	46,13	3027,18	46,19	0,027	0,130
33	1050	3123,12	46,37	3123,94	46,42	0,026	0,108
33	1100	3219,85	46,60	3220,67	46,64	0,025	0,086
36	0	1086,00	34,76	1087,00	36,00	0,092	3,567
36	50	1183,20	35,92	1184,23	37,06	0,087	3,174
36	100	1280,40	36,99	1281,44	38,04	0,081	2,839
36	150	1377,58	37,98	1378,64	38,95	0,077	2,554
36	200	1474,75	38,89	1475,83	39,78	0,073	2,289
36	250	1571,90	39,72	1573,00	40,54	0,070	2,064

Tabel A. 3 (lanjutan)

T	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
C	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
36	300	1669,03	40,49	1670,15	41,24	0,067	1,852
36	350	1766,15	41,20	1767,28	41,88	0,064	1,650
36	400	1863,24	41,85	1864,38	42,48	0,061	1,505
36	450	1960,32	42,44	1961,47	43,02	0,059	1,367
36	500	2057,37	42,99	2058,53	43,52	0,056	1,233
36	550	2154,40	43,49	2155,57	43,98	0,054	1,127
36	600	2251,41	43,95	2252,59	44,40	0,052	1,024
36	650	2348,39	44,38	2349,58	44,79	0,051	0,924
36	700	2445,35	44,77	2446,54	45,14	0,049	0,826
36	750	2542,28	45,12	2543,48	45,47	0,047	0,776
36	800	2639,18	45,45	2640,39	45,76	0,046	0,682
36	850	2736,06	45,75	2737,28	46,04	0,045	0,634
36	900	2832,91	46,02	2834,13	46,29	0,043	0,587
36	950	2929,74	46,27	2930,96	46,52	0,042	0,540
36	1000	3026,53	46,50	3027,76	46,73	0,041	0,495
36	1050	3123,30	46,71	3124,53	46,92	0,039	0,450
36	1100	3220,03	46,91	3221,27	47,09	0,039	0,384
39	0	1086,11	37,10	1087,00	39,00	0,082	5,121
39	50	1183,38	38,08	1184,29	39,82	0,077	4,569
39	100	1280,63	38,97	1281,55	40,57	0,072	4,106
39	150	1377,87	39,80	1378,80	41,27	0,067	3,693
39	200	1475,08	40,56	1476,03	41,91	0,064	3,328
39	250	1572,28	41,26	1573,24	42,50	0,061	3,005
39	300	1669,46	41,90	1670,43	43,04	0,058	2,721
39	350	1766,61	42,49	1767,59	43,53	0,055	2,448
39	400	1863,74	43,03	1864,73	43,99	0,053	2,231
39	450	1960,85	43,53	1961,85	44,41	0,051	2,022
39	500	2057,93	43,99	2058,94	44,79	0,049	1,819
39	550	2154,99	44,41	2156,00	45,15	0,047	1,666
39	600	2252,02	44,79	2253,04	45,47	0,045	1,518
39	650	2349,02	45,15	2350,05	45,77	0,044	1,373
39	700	2446,00	45,47	2447,03	46,04	0,042	1,254
39	750	2542,95	45,77	2543,99	46,29	0,041	1,136
39	800	2639,88	46,04	2640,92	46,52	0,039	1,043

Tabel A. 3 (lanjutan)

T	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
C	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
39	850	2736,77	46,29	2737,82	46,73	0,038	0,951
39	900	2833,64	46,52	2834,68	46,92	0,037	0,860
39	950	2930,47	46,73	2931,52	47,10	0,036	0,792
39	1000	3027,28	46,92	3028,33	47,26	0,035	0,725
39	1050	3124,06	47,10	3125,11	47,40	0,034	0,637
39	1100	3220,80	47,26	3221,86	47,54	0,033	0,592
Average						0,050	1,099

Pada tabel A.4 divariasikan nilai konsentrasi injeksi *MEOR* dengan penambahan sebesar 0.1kg/m³ dari keadaan awal 0.4kg/m³ dengan kondisi temperatur, tekanan dan laju aliran massa injeksi yang konstan. Didapatkan rata-rata *error* tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 1,025% dan 2,729%

Tabel A.4 Validasi model *injection well* dengan variasi konsentrasi *MEOR*

M	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
Kg/m³	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,4	0	1056	30,54	1087	31	2,936	1,506
0,4	50	1183,22	32,04	1162,7311	32,46	1,732	1,311
0,4	100	1280,34	33,41	1259,919	33,81	1,595	1,197
0,4	150	1377,45	34,69	1357,0964	35,05	1,478	1,038
0,4	200	1474,56	35,86	1454,2614	36,19	1,377	0,920
0,4	250	1571,65	36,94	1551,4125	37,24	1,288	0,812
0,4	300	1668,73	37,93	1648,548	38,21	1,209	0,738
0,4	350	1765,8	38,84	1745,6666	39,1	1,140	0,669
0,4	400	1862,85	39,68	1842,767	39,92	1,078	0,605
0,4	450	1959,88	40,46	1939,848	40,67	1,022	0,519
0,4	500	2056,9	41,17	2036,9083	41,37	0,972	0,486
0,4	550	2153,89	41,82	2133,9471	42	0,926	0,430
0,4	600	2250,87	42,47	2230,9634	42,59	0,884	0,283
0,4	650	2347,82	43,12	2327,9563	43,12	0,846	0,000
0,4	700	2444,75	43,77	2424,925	43,61	0,811	0,366

Tabel A.4 (Lanjutan)

M	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,4	750	2541,66	44,42	2521,8687	44,07	0,779	0,788
0,4	800	2638,54	45,07	2618,7868	44,48	0,749	1,309
0,4	850	2735,4	45,72	2715,6788	44,86	0,721	1,881
0,4	900	2832,23	46,37	2812,5439	45,21	0,695	2,502
0,4	950	2929,03	47,02	2909,3817	45,53	0,671	3,169
0,4	1000	3025,81	47,67	3006,1917	45,82	0,648	3,881
0,4	1050	3122,56	48,32	3102,9734	46,09	0,627	4,615
0,4	1100	3219,29	48,97	3199,7265	46,33	0,608	5,391
0,5	0	1085,000	30,804	1087	31,000	0,184	0,636
0,5	50	1178,133	31,870	1162,7311	32,380	1,307	1,599
0,5	100	1271,266	32,677	1259,919	33,658	0,893	3,000
0,5	150	1364,399	33,456	1357,0964	34,841	0,535	4,139
0,5	200	1457,532	34,224	1454,2614	35,937	0,224	5,003
0,5	250	1550,665	34,983	1551,4125	36,950	0,048	5,623
0,5	300	1643,798	35,738	1648,548	37,888	0,289	6,015
0,5	350	1736,931	36,490	1745,6666	38,755	0,503	6,205
0,5	400	1830,064	37,242	1842,767	39,556	0,694	6,214
0,5	450	1923,197	37,994	1939,848	40,296	0,866	6,061
0,5	500	2016,330	38,744	2036,9083	40,980	1,021	5,772
0,5	550	2109,463	39,495	2133,9471	41,612	1,161	5,360
0,5	600	2202,596	40,248	2230,9634	42,195	1,288	4,839
0,5	650	2295,729	41,002	2327,9563	42,733	1,404	4,223
0,5	700	2388,862	41,754	2424,925	43,230	1,510	3,534
0,5	750	2481,995	42,505	2521,8687	43,688	1,607	2,781
0,5	800	2575,128	43,257	2618,7868	44,110	1,695	1,972
0,5	850	2668,261	44,008	2715,6788	44,499	1,777	1,117
0,5	900	2761,394	44,758	2812,5439	44,858	1,852	0,223
0,5	950	2854,527	45,509	2909,3817	45,189	1,922	0,703
0,5	1000	2947,660	46,260	3006,1917	45,494	1,986	1,656
0,5	1050	3040,793	47,013	3102,9734	45,774	2,045	2,635
0,5	1100	3133,926	47,766	3199,7265	46,033	2,100	3,629
0,6	0	1086,00	30,786	1087,00	31,000	0,092	0,695
0,6	50	1179,2	31,987	1162,7311	32,305	1,397	0,994
0,6	100	1272,4	32,834	1259,919	33,513	0,981	2,068

Tabel A.4 (Lanjutan)

M Kg/m ³	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,6	150	1365,6	33,628	1357,0964	34,632	0,623	2,987
0,6	200	1458,8	34,398	1454,2614	35,667	0,311	3,688
0,6	250	1552	35,157	1551,4125	36,625	0,038	4,174
0,6	300	1645,2	35,912	1648,548	37,511	0,204	4,453
0,6	350	1738,4	36,663	1745,6666	38,330	0,418	4,545
0,6	400	1831,6	37,415	1842,767	39,087	0,610	4,469
0,6	450	1924,8	38,166	1939,848	40,786	0,782	6,865
0,6	500	2018	38,916	2036,9083	41,432	0,937	6,465
0,6	550	2111,2	39,667	2133,9471	42,028	1,077	5,952
0,6	600	2204,4	40,421	2230,9634	42,579	1,205	5,338
0,6	650	2297,6	41,175	2327,9563	43,087	1,321	4,644
0,6	700	2390,8	41,927	2424,925	43,556	1,427	3,885
0,6	750	2484	42,678	2521,8687	43,988	1,525	3,070
0,6	800	2577,2	43,429	2618,7868	44,387	1,614	2,205
0,6	850	2670,4	44,180	2715,6788	44,754	1,696	1,301
0,6	900	2763,6	44,930	2812,5439	45,093	1,771	0,362
0,6	950	2856,8	45,681	2909,3817	45,405	1,841	0,604
0,6	1000	2950	46,432	3006,1917	45,693	1,905	1,591
0,6	1050	3043,2	47,187	3102,9734	45,958	1,964	2,605
0,6	1100	3136,4	47,939	3199,7265	46,202	2,019	3,624
0,7	0	1085,00	30,80	1087,00	31,00	0,184	0,656
0,7	50	1182,13	32,09	1162,73	32,23	1,641	0,425
0,7	100	1279,26	32,96	1259,92	33,37	1,512	1,227
0,7	150	1376,38	33,76	1357,10	34,42	1,401	1,958
0,7	200	1473,50	34,53	1454,26	35,40	1,306	2,512
0,7	250	1570,63	35,29	1551,41	36,30	1,223	2,869
0,7	300	1667,75	36,04	1648,55	37,13	1,151	3,033
0,7	350	1764,87	36,79	1745,67	37,90	1,088	3,026
0,7	400	1861,99	37,54	1842,77	38,62	1,032	2,863
0,7	450	1959,11	38,29	1939,85	39,27	0,983	2,564
0,7	500	2056,23	39,04	2036,91	40,88	0,940	4,712
0,7	550	2153,35	39,79	2133,95	41,44	0,901	4,147
0,7	600	2250,47	40,55	2230,96	41,96	0,867	3,484
0,7	650	2347,59	41,30	2327,96	42,44	0,836	2,755

Tabel A.4 (Lanjutan)

M Kg/m³	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,7	700	2444,71	42,05	2424,92	42,88	0,809	1,967
0,7	750	2541,84	42,80	2521,87	43,29	0,786	1,129
0,7	800	2638,96	43,56	2618,79	43,66	0,764	0,245
0,7	850	2736,08	44,31	2715,68	44,01	0,746	0,672
0,7	900	2833,20	45,06	2812,54	44,33	0,729	1,619
0,7	950	2930,32	45,81	2909,38	44,62	0,715	2,590
0,7	1000	3027,44	46,56	3006,19	45,89	0,702	1,432
0,7	1050	3124,56	47,31	3102,97	46,14	0,691	2,481
0,7	1100	3221,68	48,07	3199,73	46,37	0,681	3,529
0,8	0	1086,000	30,703	1086,00	31,000	0,000	0,967
0,8	50	1162,033	32,189	1183,12	32,154	1,815	0,109
0,8	100	1259,642	33,070	1280,23	33,222	1,635	0,460
0,8	150	1357,240	33,865	1377,34	34,210	1,481	1,020
0,8	200	1454,824	34,630	1474,44	35,125	1,348	1,430
0,8	250	1552,394	35,385	1571,52	36,971	1,232	4,483
0,8	300	1649,947	36,137	1668,59	37,753	1,130	4,473
0,8	350	1747,483	36,887	1765,65	38,476	1,040	4,307
0,8	400	1845,001	37,638	1862,70	40,144	0,959	6,659
0,8	450	1942,498	38,389	1959,72	40,761	0,887	6,179
0,8	500	2039,975	39,139	2056,73	41,331	0,821	5,601
0,8	550	2137,430	39,890	2153,71	41,858	0,762	4,932
0,8	600	2234,862	40,647	2250,68	42,343	0,708	4,174
0,8	650	2332,270	41,399	2347,62	42,791	0,658	3,363
0,8	700	2429,653	42,150	2444,54	43,205	0,613	2,502
0,8	750	2527,012	42,901	2541,44	43,586	0,571	1,596
0,8	800	2624,344	43,652	2638,31	43,937	0,532	0,653
0,8	850	2721,651	44,402	2735,15	44,261	0,496	0,317
0,8	900	2818,930	45,153	2831,98	44,560	0,463	1,313
0,8	950	2916,181	45,904	2928,77	44,835	0,432	2,328
0,8	1000	3013,404	46,654	3025,54	45,088	0,403	3,356
0,8	1050	3110,599	47,411	3122,28	45,322	0,375	4,407
0,8	1100	3207,765	48,163	3218,99	46,537	0,350	3,376
Average						1,025	2,729

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN B Validasi Pemodelan Temperatur dan Tekanan pada *Reservoir*

Validasi model pada *reservoir* dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan hasil simulasi pada perangkat lunak COMSOL *Multiphysic*. Pada Tabel B1, nilai laju aliran massa injeksi *MEOR* divariasikan, tekanan dan temperatur injeksi yang tetap. Nilai variasi berada diantara nilai 0.051 hingga 0.054 kg/s.

Tabel B 2 Validasi model *reservoir* dengan variasi laju aliran massa injeksi

m kg/s	Kedalaman m	COMSOL		Model		%Error	
		P out	T out	P out	T out	P	T
0,051	0	3197,377	46,610	3199,424	46,676	0,064	0,142
0,051	10	3137,487	45,573	3139,537	45,635	0,065	0,136
0,051	20	3069,505	44,604	3079,558	44,662	0,328	0,130
0,051	30	3001,522	43,698	3019,486	43,752	0,598	0,124
0,051	40	2933,540	42,852	2959,322	42,903	0,879	0,118
0,051	50	2865,558	42,062	2899,064	42,109	1,169	0,113
0,051	60	2797,575	41,323	2838,714	41,367	1,470	0,107
0,051	70	2729,593	40,632	2778,270	40,674	1,783	0,102
0,051	80	2715,661	39,987	2717,733	40,025	0,076	0,097
0,051	90	2655,027	39,383	2657,102	39,419	0,078	0,092
0,051	100	2594,299	38,819	2596,378	38,853	0,080	0,087
0,052	0	3197,383	46,609	3199,430	46,675	0,064	0,143
0,052	10	3130,493	45,572	3139,543	45,634	0,289	0,136
0,052	20	3063,603	44,603	3079,564	44,661	0,521	0,130
0,052	30	2996,714	43,697	3019,492	43,752	0,760	0,124
0,052	40	2929,824	42,852	2959,328	42,902	1,007	0,118
0,052	50	2862,934	42,061	2899,070	42,108	1,262	0,113
0,052	60	2796,044	41,322	2838,720	41,367	1,526	0,107
0,052	70	2776,207	40,632	2778,276	40,673	0,075	0,102
0,052	80	2715,667	39,986	2717,739	40,025	0,076	0,097
0,052	90	2655,033	39,383	2657,108	39,419	0,078	0,092
0,052	100	2594,305	38,818	2596,384	38,852	0,080	0,087
0,053	0	3197,396	46,607	3199,436	46,674	0,064	0,145
0,053	10	3137,506	45,570	3139,550	45,633	0,065	0,138

Tabel B.1 (lanjutan)

m	Kedalaman	COMSOL		Model		%Error	
kg/s	m	P out	T out	P out	T out	P	T
0,053	20	3070,524	44,601	3079,570	44,660	0,295	0,132
0,053	30	3017,449	43,696	3019,499	43,751	0,068	0,126
0,053	40	2964,374	42,850	2959,334	42,901	0,170	0,120
0,053	50	2911,299	42,060	2899,077	42,108	0,420	0,114
0,053	60	2858,224	41,321	2838,726	41,366	0,682	0,109
0,053	70	2805,149	40,630	2778,282	40,672	0,958	0,104
0,053	80	2752,074	39,985	2717,745	40,024	1,247	0,098
0,053	90	2698,999	39,382	2657,115	39,418	1,552	0,093
0,053	100	2645,924	38,817	2596,390	38,852	1,872	0,089
0,054	0	3197,396	46,607	3199,443	46,673	0,064	0,143
0,054	10	3129,506	45,570	3139,556	45,632	0,321	0,136
0,054	20	3061,616	44,601	3079,577	44,659	0,587	0,130
0,054	30	2993,726	43,696	3019,505	43,750	0,861	0,124
0,054	40	2925,836	42,850	2959,341	42,901	1,145	0,118
0,054	50	2857,946	42,060	2899,083	42,107	1,439	0,113
0,054	60	2836,667	41,321	2838,733	41,365	0,073	0,107
0,054	70	2784,314	40,630	2778,289	40,672	0,216	0,102
0,054	80	2739,729	39,985	2717,752	40,024	0,802	0,097
0,054	90	2695,144	39,382	2657,121	39,418	1,411	0,092
0,054	100	2650,559	38,817	2596,397	38,851	2,043	0,087
<i>Average</i>						0,652	0,114

Pada tabel B.2 divariasikan nilai tekanan injeksi *MEOR* dengan penambahan sebesar 100 psia dari keadaan awal 1000 psia dengan kondisi temperatur dan laju aliran massa injeksi yang konstan. Didapatkan rata-rata *error* tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,166% dan 0,114%

Tabel B. 2 Validasi model *reservoir* dengan variasi tekanan

P	Kedalaman	COMSOL		Model		%Error	
psia	m	P out	T out	P out	T out	P	T
1000	0	3110,991	46,608	3113,038	46,675	0,066	0,142
1000	10	3050,968	45,572	3053,018	45,634	0,067	0,136

Tabel B. 2 (Lanjutan)

P	Kedalaman	COMSOL		Model		%Error	
		P out	T out	P out	P out	T out	P out
1000	20	2990,852	44,604	2992,905	44,662	0,069	0,130
1000	30	2930,643	43,700	2932,699	43,754	0,070	0,124
1000	40	2870,341	42,855	2872,401	42,905	0,072	0,118
1000	50	2809,946	42,065	2812,009	42,112	0,073	0,113
1000	60	2745,458	41,327	2751,524	41,371	0,221	0,107
1000	70	2680,970	40,637	2690,945	40,678	0,372	0,102
1000	80	2616,482	39,992	2630,273	40,030	0,527	0,097
1000	90	2551,994	39,388	2569,508	39,425	0,686	0,092
1000	100	2487,505	38,824	2508,648	38,858	0,850	0,087
1100	0	3210,285	46,610	3212,332	46,677	0,064	0,142
1100	10	3150,415	45,573	3152,465	45,635	0,065	0,136
1100	20	3090,453	44,603	3092,506	44,661	0,066	0,130
1100	30	3022,398	43,698	3032,454	43,752	0,333	0,124
1100	40	2954,343	42,852	2972,310	42,903	0,608	0,118
1100	50	2886,288	42,061	2912,072	42,109	0,893	0,113
1100	60	2818,233	41,322	2851,742	41,367	1,189	0,107
1100	70	2750,178	40,632	2791,318	40,673	1,496	0,102
1100	80	2682,123	39,986	2730,801	40,025	1,815	0,097
1100	90	2614,068	39,382	2670,191	39,419	2,147	0,092
1100	100	2546,013	38,818	2609,487	38,852	2,493	0,087
1200	0	3309,580	46,612	3311,627	46,678	0,062	0,143
1200	10	3249,863	45,573	3251,913	45,635	0,063	0,136
1200	20	3181,205	44,602	3192,107	44,660	0,343	0,130
1200	30	3112,548	43,696	3132,209	43,750	0,632	0,124
1200	40	3043,890	42,849	3072,218	42,899	0,931	0,118
1200	50	3010,073	42,057	3012,135	42,104	0,069	0,113
1200	60	2949,894	41,317	2951,959	41,362	0,070	0,107
1200	70	2883,622	40,626	2891,691	40,668	0,280	0,102
1200	80	2817,350	39,980	2831,329	40,019	0,496	0,097
1200	90	2751,077	39,376	2770,873	39,412	0,720	0,092
1200	100	2684,805	38,811	2710,325	38,845	0,951	0,087
1300	0	3408,874	46,613	3410,921	46,679	0,060	0,143
1300	10	3342,310	45,572	3351,360	45,635	0,271	0,136
1300	20	3275,746	44,601	3291,708	44,659	0,487	0,130

Tabel B. 2 (Lanjutan)

P psia	Kedalaman m	COMSOL		Model		%Error	
		P out	T out	P out	P out	T out	P out
1300	30	3209,183	43,693	3231,963	43,747	0,710	0,124
1300	40	3142,619	42,845	3172,127	42,896	0,939	0,118
1300	50	3076,056	42,053	3112,198	42,100	1,175	0,113
1300	60	3009,492	41,312	3052,176	41,357	1,418	0,107
1300	70	2942,928	40,620	2992,062	40,662	1,670	0,102
1300	80	2929,783	39,974	2931,855	40,013	0,071	0,097
1300	90	2869,480	39,369	2871,556	39,406	0,072	0,092
1300	100	2809,084	38,805	2811,163	38,838	0,074	0,087
<i>Average</i>						0,166	0,114

Pada tabel B.3, divariasikan nilai temperatur injeksi *MEOR* dengan kenaikan sebesar 3°C dari keadaan awal 31°C . Kondisi laju aliran massa dan tekanan injeksi konstan. Didapatkan rata-rata *error* model gradien tekanan dan temperatur adalah masing-masing sebesar 0,050 % dan 1,099%.

Tabel B. 3 Validasi model *injection well* dengan variasi temperatur

T C	Kedalaman m	COMSOL		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
31	0	3196,48	46,61	3199,42	46,68	0,092	0,143
31	10	3136,59	45,57	3139,54	45,63	0,094	0,136
31	20	3076,61	44,60	3079,56	44,66	0,096	0,130
31	30	3016,53	43,70	3019,49	43,75	0,098	0,124
31	40	2947,36	42,85	2959,32	42,90	0,406	0,118
31	50	2896,10	42,06	2899,06	42,11	0,102	0,113
31	60	2844,84	41,32	2838,71	41,37	0,215	0,107
31	70	2793,58	40,63	2778,27	40,67	0,548	0,102
31	80	2742,31	39,99	2717,73	40,03	0,896	0,097
31	90	2691,05	39,38	2657,10	39,42	1,262	0,092
31	100	2639,79	38,82	2596,38	38,85	1,645	0,087
33	0	3196,93	46,87	3199,67	46,94	3196,93	46,87
33	10	3137,03	45,82	3139,78	45,88	3137,03	45,82
33	20	3077,05	44,83	3079,80	44,89	3077,05	44,83

Tabel B. 3 (Lanjutan)

T	Kedalaman	COMSOL	Model	%Error	COMSOL	Model	%Error
C	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
33	30	3016,98	43,91	3019,73	43,97	3016,98	43,91
33	40	2956,81	43,05	2959,57	43,10	2956,81	43,05
33	50	2896,55	42,25	2899,31	42,30	2896,55	42,25
33	60	2828,19	41,50	2838,96	41,54	2828,19	41,50
33	70	2759,84	40,80	2778,52	40,84	2759,84	40,80
33	80	2691,48	40,14	2717,98	40,18	2691,48	40,14
33	90	2623,13	39,53	2657,35	39,56	2623,13	39,53
33	100	2554,77	38,95	2596,62	38,99	2554,77	38,95
36	0	3196,99	47,27	3200,03	47,33	0,095	0,138
36	10	3137,10	46,19	3140,14	46,25	0,097	0,132
36	20	3066,12	45,18	3080,16	45,24	0,458	0,126
36	30	2995,13	44,24	3020,09	44,29	0,833	0,120
36	40	2924,15	43,35	2959,93	43,40	1,224	0,114
36	50	2853,17	42,53	2899,67	42,58	1,630	0,109
36	60	2782,18	41,76	2839,32	41,81	2,054	0,104
36	70	2711,20	41,04	2778,88	41,08	2,496	0,099
36	80	2640,22	40,37	2718,34	40,41	2,959	0,094
36	90	2569,23	39,74	2657,71	39,78	3,444	0,089
36	100	2498,25	39,16	2596,99	39,19	3,952	0,085
39	0	3197,35	47,65	3200,39	47,72	0,095	0,134
39	10	3130,46	46,55	3140,50	46,61	0,321	0,128
39	20	3063,57	45,52	3080,52	45,57	0,553	0,123
39	30	2996,68	44,55	3020,45	44,60	0,793	0,117
39	40	2929,79	43,65	2960,29	43,70	1,041	0,112
39	50	2862,90	42,81	2900,03	42,85	1,297	0,106
39	60	2796,01	42,02	2839,68	42,06	1,562	0,101
39	70	2729,12	41,29	2779,24	41,33	1,837	0,096
39	80	2662,23	40,60	2718,71	40,64	2,121	0,092
39	90	2595,34	39,96	2658,08	39,99	2,417	0,087
39	100	2594,27	39,35	2597,35	39,39	0,119	0,083
<i>Average</i>						0,963	0,111

Pada tabel A.4 divariasikan nilai konsentrasi injeksi *MEOR* dengan penambahan sebesar 0.1kg/m³ dari keadaan awal

0.4kg/m³ dengan kondisi temperatur, tekanan dan laju aliran massa injeksi yang konstan. Didapatkan rata-rata *error* tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,718% dan 0,113%

Tabel B.4 Validasi model *reservoir* dengan variasi konsentrasi *MEOR*

M Kg/m ³	Kedalaman m	COMSOL		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,4	0	3195,69	46,61	3199,73	46,68	0,126	0,142
0,4	10	3135,80	45,57	3139,84	45,64	0,129	0,136
0,4	20	3075,82	44,60	3079,86	44,66	0,132	0,130
0,4	30	3001,74	43,70	3019,79	43,75	0,601	0,124
0,4	40	2927,66	42,85	2959,63	42,90	1,092	0,118
0,4	50	2853,58	42,06	2899,37	42,11	1,604	0,112
0,4	60	2779,51	41,32	2839,02	41,37	2,141	0,107
0,4	70	2705,43	40,63	2778,58	40,67	2,704	0,102
0,4	80	2713,96	39,99	2718,04	40,03	0,150	0,097
0,4	90	2653,32	39,38	2657,41	39,42	0,154	0,092
0,4	100	2592,59	38,82	2596,68	38,85	0,158	0,087
0,5	0	3195,78	46,60	3199,42	46,68	0,114	0,171
0,5	10	3135,88	45,56	3139,54	45,63	0,116	0,163
0,5	20	3075,90	44,59	3079,56	44,66	0,119	0,156
0,5	30	3015,82	43,69	3019,49	43,75	0,122	0,149
0,5	40	2955,65	42,84	2959,32	42,90	0,124	0,142
0,5	50	2895,39	42,05	2899,06	42,11	0,127	0,135
0,5	60	2835,03	41,31	2838,71	41,37	0,130	0,129
0,5	70	2768,58	40,62	2778,27	40,67	0,350	0,122
0,5	80	2702,13	39,98	2717,73	40,03	0,577	0,116
0,5	90	2635,68	39,38	2657,10	39,42	0,813	0,110
0,5	100	2569,23	38,81	2596,38	38,85	1,056	0,105
0,6	0	3195,17	46,57	3199,14	46,68	0,124	0,228
0,6	10	3135,28	45,53	3139,26	45,63	0,127	0,218
0,6	20	3075,29	44,57	3079,28	44,66	0,129	0,208
0,6	30	3015,22	43,66	3019,20	43,75	0,132	0,199
0,6	40	2945,04	42,82	2959,04	42,90	0,475	0,189
0,6	50	2874,87	42,03	2898,78	42,11	0,832	0,180
0,6	60	2804,70	41,30	2838,43	41,37	1,203	0,172

Tabel B.4 (Lanjutan)

M Kg/m³	Kedalaman m	COMSOL		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,6	70	2734,53	40,61	2777,99	40,67	1,589	0,163
0,6	80	2664,36	39,96	2717,45	40,02	1,993	0,155
0,6	90	2594,19	39,36	2656,82	39,42	2,414	0,147
0,6	100	2524,02	38,80	2596,09	38,85	2,856	0,140
0,7	0	3195,16	46,63	3198,87	46,67	0,116	0,086
0,7	10	3135,26	45,59	3138,98	45,63	0,119	0,082
0,7	20	3075,28	44,62	3079,00	44,66	0,121	0,078
0,7	30	3007,20	43,72	3018,93	43,75	0,390	0,074
0,7	40	2939,12	42,87	2958,76	42,90	0,668	0,071
0,7	50	2871,04	42,08	2898,50	42,11	0,956	0,067
0,7	60	2802,96	41,34	2838,15	41,37	1,255	0,064
0,7	70	2734,88	40,65	2777,71	40,67	1,566	0,061
0,7	80	2666,81	40,00	2717,17	40,02	1,888	0,058
0,7	90	2652,77	39,40	2656,54	39,42	0,142	0,055
0,7	100	2592,04	38,83	2595,81	38,85	0,145	0,052
0,8	0	3194,880	46,632	3198,59	46,672	0,116	0,086
0,8	10	3134,986	45,594	3138,70	45,631	0,119	0,082
0,8	20	3071,000	44,623	3078,72	44,658	0,251	0,078
0,8	30	3007,014	43,717	3018,65	43,749	0,387	0,074
0,8	40	2943,027	42,869	2958,48	42,900	0,525	0,071
0,8	50	2879,041	42,078	2898,22	42,106	0,666	0,067
0,8	60	2815,055	41,338	2837,87	41,364	0,811	0,064
0,8	70	2751,069	40,646	2777,43	40,671	0,958	0,061
0,8	80	2687,082	40,000	2716,89	40,023	1,109	0,058
0,8	90	2623,096	39,396	2656,26	39,417	1,264	0,055
0,8	100	2559,110	38,831	2595,53	38,851	1,423	0,052
<i>Average</i>						0,718	0,113

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN C Validasi Pemodelan Temperatur dan Tekanan pada *Production Well*

Validasi model pada *production well* dilakukan dengan membandingkan hasil model dengan hasil simulasi pada perangkat lunak PIPESIM. Pada Tabel A1, nilai laju aliran massa injeksi *MEOR* divariasikan, tekanan dan temperatur injeksi yang tetap. Nilai variasi berada diantara nilai 0.051 hingga 0.054 kg/s.

Tabel C.3 Validasi model *production well* dengan variasi laju aliran massa injeksi

m kg/s	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	T out	P	T
0,051	1100	2596,378	38,853	2591,597	38,440	0,184	1,062
0,051	1050	2517,493	37,740	2512,730	37,345	0,189	1,046
0,051	1000	2419,242	37,383	2414,460	36,991	0,198	1,049
0,051	950	2320,992	37,033	2316,190	36,644	0,207	1,052
0,051	900	2222,742	36,392	2217,921	36,305	0,217	0,239
0,051	850	2124,494	35,751	2119,654	35,975	0,228	0,625
0,051	800	2026,247	36,033	2021,388	35,651	0,240	1,059
0,051	750	1928,001	35,414	1923,124	35,335	0,253	0,223
0,051	700	1829,758	34,796	1824,862	35,027	0,268	0,663
0,051	650	1731,518	34,177	1726,603	34,725	0,284	1,602
0,051	600	1633,281	34,801	1628,348	34,430	0,302	1,066
0,051	550	1535,046	34,510	1530,095	34,142	0,323	1,068
0,051	500	1436,816	34,226	1431,847	33,860	0,346	1,069
0,051	450	1338,590	33,948	1333,602	33,584	0,373	1,070
0,051	400	1240,368	33,676	1235,363	33,315	0,404	1,071
0,051	350	1142,150	33,410	1137,128	33,052	0,440	1,072
0,051	300	1043,938	33,150	1038,898	32,794	0,483	1,073
0,051	250	945,731	32,896	940,673	32,543	0,535	1,073
0,051	200	847,529	32,647	842,454	32,297	0,599	1,074
0,051	150	749,334	32,404	744,242	32,056	0,680	1,074
0,051	100	651,144	32,166	646,035	31,820	0,785	1,074
0,051	50	552,961	31,933	547,835	31,590	0,927	1,074
0,051	0	454,784	31,705	449,642	31,365	1,131	1,075

Tabel C.1 (lanjutan)

m kg/s	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	T out	P	T
0,052	1100	2596,384	38,852	2591,728	38,509	0,179	0,883
0,052	1050	2517,499	37,741	2512,859	37,413	0,184	0,870
0,052	1000	2419,248	37,384	2414,592	37,058	0,192	0,872
0,052	950	2320,998	37,035	2316,325	36,712	0,201	0,874
0,052	900	2222,748	36,694	2218,059	36,373	0,211	0,877
0,052	850	2124,499	36,361	2119,795	36,042	0,221	0,879
0,052	800	2026,252	36,035	2021,532	35,718	0,233	0,880
0,052	750	1928,006	35,717	1923,271	35,402	0,246	0,882
0,052	700	1829,763	35,206	1825,013	35,093	0,260	0,320
0,052	650	1731,522	34,695	1726,757	34,791	0,275	0,278
0,052	600	1633,285	34,183	1628,504	34,496	0,293	0,914
0,052	550	1535,051	33,672	1530,255	34,207	0,312	1,589
0,052	500	1436,820	33,161	1432,009	33,925	0,335	2,305
0,052	450	1338,594	33,951	1333,768	33,650	0,360	0,889
0,052	400	1240,372	33,680	1235,531	33,380	0,390	0,890
0,052	350	1142,154	33,414	1137,299	33,116	0,425	0,890
0,052	300	1043,942	33,154	1039,073	32,859	0,466	0,891
0,052	250	945,734	32,900	940,851	32,607	0,516	0,891
0,052	200	847,533	32,651	842,635	32,360	0,578	0,892
0,052	150	749,337	32,408	744,425	32,119	0,655	0,892
0,052	100	651,147	32,171	646,222	31,884	0,756	0,892
0,052	50	552,964	31,938	548,025	31,653	0,893	0,892
0,052	0	454,788	31,711	449,834	31,428	1,089	0,892
0,053	1100	2596,390	38,852	2593,877	38,578	0,097	0,706
0,053	1050	2517,505	37,743	2515,003	37,481	0,099	0,695
0,053	1000	2419,254	37,386	2416,739	37,125	0,104	0,697
0,053	950	2321,003	37,037	2318,475	36,778	0,109	0,699
0,053	900	2222,753	36,697	2220,212	36,439	0,114	0,701
0,053	850	2124,504	36,363	2121,951	36,108	0,120	0,703
0,053	800	2026,257	36,038	2023,690	35,784	0,127	0,704
0,053	750	1928,011	35,720	1925,432	35,468	0,134	0,706
0,053	700	1829,768	35,409	1827,176	35,158	0,142	0,707
0,053	650	1731,527	35,105	1728,923	34,856	0,150	0,708
0,053	600	1633,289	34,607	1630,673	34,560	0,160	0,136

Tabel C.1 (lanjutan)

m	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
kg/s	m	P out	T out	P out	T out	P	T
0,053	550	1535,055	34,110	1532,427	34,272	0,171	0,473
0,053	500	1436,824	33,613	1434,184	33,989	0,184	1,119
0,053	450	1338,598	33,116	1335,945	33,713	0,198	1,804
0,053	400	1240,375	33,683	1237,711	33,443	0,215	0,713
0,053	350	1142,158	33,418	1139,481	33,179	0,234	0,714
0,053	300	1043,945	33,158	1041,257	32,921	0,258	0,714
0,053	250	945,738	32,904	943,038	32,669	0,285	0,715
0,053	200	847,536	32,656	844,825	32,422	0,320	0,715
0,053	150	749,340	32,413	746,617	32,181	0,363	0,716
0,053	100	651,151	32,175	648,416	31,945	0,420	0,716
0,053	50	552,967	31,943	550,221	31,714	0,497	0,716
0,053	0	454,791	31,715	452,033	31,488	0,606	0,716
0,054	1100	2596,397	38,851	2594,132	38,715	0,087	0,351
0,054	1050	2517,511	37,744	2515,253	37,614	0,090	0,346
0,054	1000	2419,260	37,388	2416,995	37,258	0,094	0,347
0,054	950	2321,009	37,039	2318,738	36,910	0,098	0,348
0,054	900	2222,759	36,499	2220,481	36,571	0,102	0,198
0,054	850	2124,510	35,958	2122,226	36,239	0,107	0,781
0,054	800	2026,262	35,417	2023,972	35,914	0,113	1,403
0,054	750	1928,016	34,877	1925,720	35,597	0,119	2,066
0,054	700	1829,772	34,336	1827,471	35,287	0,126	2,770
0,054	650	1731,532	33,796	1729,224	34,984	0,133	3,517
0,054	600	1633,294	33,811	1630,980	34,688	0,142	2,595
0,054	550	1535,059	33,520	1532,740	34,399	0,151	2,620
0,054	500	1436,829	33,236	1434,503	34,116	0,162	2,645
0,054	450	1338,602	32,959	1336,271	33,839	0,174	2,670
0,054	400	1240,379	32,687	1238,042	33,568	0,188	2,695
0,054	350	1142,162	33,422	1139,819	33,304	0,205	0,353
0,054	300	1043,949	33,162	1041,601	33,045	0,225	0,354
0,054	250	945,742	32,909	943,388	32,792	0,249	0,354
0,054	200	847,540	32,660	845,180	32,545	0,278	0,354
0,054	150	749,344	31,417	746,979	32,303	0,316	2,818
0,054	100	651,154	31,180	648,784	32,066	0,364	2,842
0,054	50	552,971	30,948	550,595	31,835	0,430	2,866

Tabel C.1 (lanjutan)

m	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
kg/s	m	P out	T out	P out	T out	P	T
0,054	0	454,794	30,720	452,413	31,608	0,524	2,890
AVERAGE						0,309	1,077

Pada tabel C.2 divariasikan nilai tekanan injeksi *MEOR* dengan penambahan sebesar 100 psia dari keadaan awal 1000 psia dengan kondisi temperatur dan laju aliran massa injeksi yang konstan. Didapatkan rata-rata *error* tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,204% dan 1,150%

Tabel C. 2 Validasi model *production well* dengan variasi tekanan

P	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
psia	m	P out	T out	P out	T out	P	T
1000	1100	2596,810	38,852	2596,384	38,509	0,016	0,883
1000	1050	2517,925	37,741	2517,499	37,413	0,017	0,870
1000	1000	2419,674	37,384	2419,248	37,058	0,018	0,872
1000	950	2321,424	37,035	2320,998	36,712	0,018	0,874
1000	900	2223,174	36,694	2222,748	36,373	0,019	0,877
1000	850	2124,926	36,361	2124,499	36,042	0,020	0,879
1000	800	2026,679	36,035	2026,252	35,718	0,021	0,880
1000	750	1928,433	35,717	1928,006	35,402	0,022	0,882
1000	700	1830,190	35,206	1829,763	35,093	0,023	0,320
1000	650	1731,950	34,695	1731,522	34,791	0,025	0,278
1000	600	1633,713	34,183	1633,285	34,496	0,026	0,914
1000	550	1535,478	33,672	1535,051	34,207	0,028	1,589
1000	500	1437,248	33,161	1436,820	33,925	0,030	2,305
1000	450	1339,022	33,951	1338,594	33,650	0,032	0,889
1000	400	1240,800	33,680	1240,372	33,380	0,035	0,890
1000	350	1142,582	33,414	1142,154	33,116	0,037	0,890
1000	300	1044,370	33,154	1043,942	32,859	0,041	0,891
1000	250	946,163	32,900	945,734	32,607	0,045	0,891
1000	200	847,961	32,651	847,533	32,360	0,051	0,892
1000	150	749,766	32,408	749,337	32,119	0,057	0,892
1000	100	651,576	32,171	651,147	31,884	0,066	0,892

Tabel C. 2 (lanjutan)

P psia	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	T out	P	T
1000	50	553,393	31,938	552,964	31,653	0,077	0,892
1000	0	455,216	31,711	454,788	31,428	0,094	0,892
1100	1100	2596,084	38,728	2591,728	37,966	0,168	1,968
1100	1050	2517,199	37,617	2512,859	36,870	0,172	1,986
1100	1000	2418,948	37,260	2414,592	36,515	0,180	2,000
1100	950	2320,698	36,911	2316,325	36,169	0,188	2,013
1100	900	2222,448	36,570	2218,059	36,230	0,197	0,932
1100	850	2124,199	36,237	2119,795	35,899	0,207	0,934
1100	800	2025,952	35,911	2021,532	35,575	0,218	0,936
1100	750	1927,706	35,593	1923,271	35,259	0,230	0,938
1100	700	1829,463	35,082	1825,013	34,550	0,243	1,516
1100	650	1731,222	34,571	1726,757	34,248	0,258	0,933
1100	600	1632,985	34,059	1628,504	33,953	0,274	0,313
1100	550	1534,751	33,548	1535,055	33,664	0,020	0,346
1100	500	1436,520	33,037	1428,824	33,382	0,536	1,045
1100	450	1338,294	33,827	1338,598	33,107	0,023	2,131
1100	400	1240,072	33,556	1240,375	33,456	0,025	0,298
1100	350	1141,854	33,290	1142,158	33,190	0,027	0,300
1100	300	1043,642	33,030	1043,945	32,930	0,029	0,303
1100	250	945,434	32,776	945,738	32,676	0,032	0,305
1100	200	847,233	32,527	847,536	32,427	0,036	0,307
1100	150	749,037	32,284	749,340	32,184	0,041	0,310
1100	100	650,847	32,047	651,151	31,947	0,047	0,312
1100	50	552,664	31,814	552,967	31,714	0,055	0,314
1100	0	454,488	31,587	454,791	31,487	0,067	0,317
1200	1100	2597,590	39,052	2593,877	38,712	0,143	0,871
1200	1050	2518,705	37,943	2516,203	37,615	0,099	0,865
1200	1000	2420,454	37,586	2417,939	37,259	0,104	0,869
1200	950	2322,203	37,237	2319,675	36,912	0,109	0,872
1200	900	2223,953	36,897	2221,412	36,573	0,114	0,876
1200	850	2125,704	36,563	2123,151	36,242	0,120	0,879
1200	800	2027,457	36,238	2024,890	35,918	0,127	0,883
1200	750	1929,211	35,920	1926,632	35,602	0,134	0,886
1200	700	1830,968	35,609	1828,376	35,292	0,142	0,889

Tabel C. 2 (lanjutan)

P	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	P out	T out	P out
1200	650	1732,727	35,305	1730,123	34,990	0,150	0,891
1200	600	1634,489	34,807	1631,873	34,694	0,160	0,325
1200	550	1536,255	34,310	1533,627	34,406	0,171	0,278
1200	500	1438,024	34,113	1435,384	34,123	0,184	0,030
1200	450	1339,798	33,616	1337,145	33,847	0,198	0,688
1200	400	1241,575	34,183	1238,911	33,577	0,215	1,773
1200	350	1143,358	33,918	1140,681	33,313	0,234	1,782
1200	300	1045,145	33,658	1042,457	33,055	0,257	1,791
1200	250	946,938	33,404	944,238	32,803	0,285	1,800
1200	200	848,736	33,156	846,025	32,556	0,319	1,808
1200	150	750,540	32,913	747,817	32,315	0,363	1,817
1200	100	652,351	32,675	649,616	32,079	0,419	1,825
1200	50	554,167	32,443	551,421	31,848	0,496	1,833
1200	0	455,991	32,215	453,233	31,622	0,605	1,841
1300	1100	2599,797	39,171	2594,897	39,615	0,188	1,132
1300	1050	2520,911	38,064	2516,018	38,514	0,194	1,181
1300	1000	2422,660	37,708	2417,760	38,158	0,202	1,194
1300	950	2324,409	37,359	2319,503	37,810	0,211	1,208
1300	900	2226,159	36,819	2221,246	37,471	0,221	1,771
1300	850	2127,910	36,278	2122,991	36,372	0,231	0,259
1300	800	2029,662	35,737	2024,737	36,139	0,243	1,123
1300	750	1931,416	35,197	1926,485	35,716	0,255	1,474
1300	700	1833,172	34,656	1828,236	35,497	0,269	2,427
1300	650	1734,932	34,116	1729,989	35,089	0,285	2,852
1300	600	1636,694	34,131	1631,745	34,884	0,302	2,208
1300	550	1538,459	33,840	1533,505	34,489	0,322	1,919
1300	500	1440,229	33,556	1435,268	34,299	0,344	2,212
1300	450	1342,002	33,279	1337,036	33,917	0,370	1,918
1300	400	1243,779	33,007	1238,807	33,739	0,400	2,216
1300	350	1145,562	33,742	1140,584	33,370	0,435	1,103
1300	300	1047,349	33,482	1042,366	33,204	0,476	0,832
1300	250	949,142	33,229	944,153	32,846	0,526	1,150
1300	200	850,940	32,980	845,945	32,692	0,587	0,874
1300	150	752,744	31,737	747,744	32,346	0,664	1,918

Tabel C. 2 (lanjutan)

P	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	T out	P out	P out	T out	P out
1300	100	654,554	31,500	649,549	32,203	0,765	2,231
1300	50	556,371	31,268	551,360	31,867	0,901	1,918
1300	0	458,194	31,040	453,178	31,735	1,095	2,236
Average						0,204	1,150

Pada tabel C.3, divariasikan nilai temperatur injeksi *MEOR* dengan kenaikan sebesar 3°C dari keadaan awal 31°C. Kondisi laju aliran massa dan tekanan injeksi konstan. Didapatkan rata-rata *error* model gradien tekanan dan temperatur adalah masing-masing sebesar 0,100 % dan 1,074%.

Tabel C. 3 Validasi model *production well* variasi temperatur

T	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
31	1100	2597,023	38,639	2595,952	38,722	0,041	0,214
31	1050	2518,138	37,528	2517,067	37,626	0,043	0,260
31	1000	2419,887	37,171	2418,816	37,271	0,044	0,269
31	950	2321,637	36,822	2320,566	36,925	0,046	0,277
31	900	2223,387	36,481	2222,316	36,586	0,048	0,286
31	850	2125,139	36,148	2124,067	36,255	0,050	0,295
31	800	2026,892	35,822	2025,820	35,931	0,053	0,304
31	750	1928,646	35,504	1927,574	35,615	0,056	0,313
31	700	1830,403	34,993	1829,331	35,306	0,059	0,895
31	650	1732,163	34,482	1731,090	35,004	0,062	1,515
31	600	1633,926	33,970	1632,853	34,709	0,066	2,174
31	550	1535,691	33,459	1534,619	34,420	0,070	2,873
31	500	1437,461	32,948	1436,388	34,138	0,075	3,613
31	450	1339,235	33,738	1338,162	33,863	0,080	0,368
31	400	1241,013	33,467	1239,940	33,593	0,086	0,378
31	350	1142,795	33,201	1141,722	33,329	0,094	0,387
31	300	1044,583	32,941	1043,510	33,072	0,103	0,397
31	250	946,376	32,687	945,302	32,820	0,113	0,406

Tabel C. 3 (lanjutan)

T	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
C	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
31	200	946,376	32,687	945,302	32,820	0,113	0,406
31	150	848,174	32,438	847,101	32,573	0,127	0,416
31	100	749,979	32,195	748,905	32,332	0,143	0,425
31	50	651,789	31,958	650,715	32,097	0,165	0,435
31	0	553,606	31,725	552,532	31,866	0,194	0,445
33	1100	2597,146	39,051	2596,246	38,582	0,035	1,201
33	1050	2518,261	37,940	2517,361	37,486	0,036	1,197
33	1000	2420,010	37,583	2419,110	37,131	0,037	1,203
33	950	2321,760	37,234	2320,860	36,785	0,039	1,208
33	900	2223,510	36,893	2222,610	36,446	0,040	1,213
33	850	2125,262	36,560	2124,362	36,115	0,042	1,218
33	800	2027,015	36,234	2026,115	35,791	0,044	1,223
33	750	1928,769	35,916	1927,869	35,475	0,047	1,228
33	700	1830,526	35,405	1829,626	35,166	0,049	0,674
33	650	1732,286	34,894	1731,386	34,864	0,052	0,085
33	600	1634,049	34,382	1633,149	34,569	0,055	0,542
33	550	1535,814	33,871	1534,914	34,280	0,059	1,208
33	500	1437,584	33,360	1436,684	33,998	0,063	1,913
33	450	1339,358	34,150	1338,458	33,723	0,067	1,253
33	400	1241,136	33,879	1240,236	33,453	0,073	1,256
33	350	1142,918	33,613	1142,018	33,189	0,079	1,260
33	300	1044,706	33,353	1043,806	32,932	0,086	1,263
33	250	946,499	33,099	945,599	32,680	0,095	1,267
33	200	848,297	32,850	847,397	32,433	0,106	1,270
33	150	750,102	32,607	749,202	32,192	0,120	1,273
33	100	651,912	32,370	651,012	31,957	0,138	1,276
33	50	553,729	32,137	552,829	31,726	0,163	1,279
33	0	455,552	31,910	454,652	31,501	0,198	1,281
36	1100	2598,455	39,372	2596,610	39,812	0,071	1,117
36	1050	2519,570	38,263	2517,725	38,715	0,073	1,181
36	1000	2421,319	37,906	2419,474	38,359	0,076	1,196
36	950	2323,068	37,557	2321,223	38,012	0,079	1,212
36	900	2224,818	37,217	2222,973	37,673	0,083	1,227
36	850	2126,569	36,883	2124,724	37,342	0,087	1,243

Tabel C. 3 (lanjutan)

T	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
C	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
36	800	2028,322	36,558	2026,477	37,018	0,091	1,259
36	750	1930,076	36,240	1928,231	36,702	0,096	1,275
36	700	1831,833	35,929	1829,988	36,392	0,101	1,290
36	650	1733,592	35,625	1731,747	36,090	0,106	1,306
36	600	1635,354	35,127	1633,509	35,794	0,113	1,899
36	550	1537,120	34,630	1535,275	35,506	0,120	2,528
36	500	1438,889	34,433	1437,044	35,223	0,128	2,295
36	450	1340,663	33,936	1338,818	34,947	0,138	2,980
36	400	1242,440	34,503	1240,595	34,677	0,148	0,504
36	350	1144,223	34,238	1142,378	34,413	0,161	0,512
36	300	1046,010	33,978	1044,165	34,155	0,176	0,521
36	250	947,803	33,724	945,958	33,903	0,195	0,530
36	200	849,601	33,476	847,756	33,656	0,217	0,539
36	150	751,405	33,233	749,560	33,415	0,246	0,548
36	100	653,216	32,995	651,371	33,179	0,282	0,556
36	50	555,032	32,763	553,187	32,948	0,332	0,565
36	0	456,856	32,535	455,011	32,722	0,404	0,574
39	1100	2600,028	38,526	2599,037	38,715	0,038	0,489
39	1050	2521,142	37,419	2520,151	37,614	0,039	0,520
39	1000	2422,891	37,063	2421,900	37,258	0,041	0,527
39	950	2324,640	36,714	2323,649	36,910	0,043	0,534
39	900	2226,390	36,174	2225,399	36,571	0,045	1,098
39	850	2128,141	35,633	2127,150	35,472	0,047	0,451
39	800	2029,893	35,092	2028,902	35,239	0,049	0,417
39	750	1931,647	34,552	1930,656	34,816	0,051	0,764
39	700	1833,403	34,011	1832,412	34,597	0,054	1,723
39	650	1735,163	33,471	1734,172	34,189	0,057	2,145
39	600	1636,925	33,486	1635,934	33,984	0,061	1,489
39	550	1538,690	33,195	1537,699	33,589	0,064	1,188
39	500	1440,460	32,911	1439,469	33,399	0,069	1,481
39	450	1342,233	32,634	1341,242	33,017	0,074	1,174
39	400	1244,010	32,362	1243,019	32,839	0,080	1,473
39	350	1145,793	33,097	1144,802	32,470	0,086	1,895
39	300	1047,580	32,837	1046,589	32,304	0,095	1,625

Tabel C. 3 (lanjutan)

T	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
C	M	P out	P out	P out	P out	P out	P out
39	250	949,373	32,584	948,382	31,946	0,104	1,955
39	200	851,171	32,335	850,180	31,792	0,116	1,680
39	150	752,975	31,092	751,984	31,446	0,132	1,137
39	100	654,785	30,855	653,794	31,303	0,151	1,451
39	50	556,602	30,623	555,611	30,967	0,178	1,126
39	0	458,425	30,395	457,434	30,835	0,216	1,445
Average						0,100	1,074

Pada tabel C.4 divariasikan nilai konsentrasi injeksi *MEOR* dengan penambahan sebesar 0.4 kg/m³ dari keadaan awal 0.7 kg/m³ dengan kondisi temperatur, tekanan dan laju aliran massa injeksi yang konstan. Didapatkan rata-rata *error* tekanan dan temperatur masing-masing sebesar 0,187% dan 0,825%

Tabel C.4 Validasi model *production well* dengan variasi konsentrasi *MEOR*

M	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
Kg/m ³	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,4	1100	2597,146	39,071	2595,120	38,611	0,078	1,178
0,4	1050	2518,261	37,960	2516,235	37,515	0,080	1,173
0,4	1000	2420,010	37,603	2417,984	37,160	0,084	1,178
0,4	950	2321,760	37,254	2319,734	36,814	0,087	1,183
0,4	900	2223,510	36,913	2221,484	36,475	0,091	1,188
0,4	850	2125,262	36,580	2123,235	36,144	0,095	1,193
0,4	800	2027,015	36,254	2024,988	35,820	0,100	1,198
0,4	750	1928,769	35,936	1926,742	35,504	0,105	1,202
0,4	700	1830,526	35,425	1828,499	35,195	0,111	0,649
0,4	650	1732,286	34,914	1730,258	34,893	0,117	0,059
0,4	600	1634,049	34,402	1632,021	34,598	0,124	0,568
0,4	550	1535,814	33,891	1533,787	34,309	0,132	1,234
0,4	500	1437,584	33,380	1435,556	34,027	0,141	1,939
0,4	450	1339,358	34,170	1337,330	33,752	0,151	1,226
0,4	400	1241,136	33,899	1239,108	33,482	0,163	1,229

Tabel C.4 (Lanjutan)

M Kg/m³	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,4	350	1142,918	33,633	1140,890	33,218	0,177	1,232
0,4	300	1044,706	33,373	1042,678	32,961	0,194	1,236
0,4	250	946,499	33,119	944,470	32,709	0,214	1,239
0,4	200	848,297	32,870	846,269	32,462	0,239	1,242
0,4	150	750,102	32,627	748,073	32,221	0,270	1,244
0,4	100	651,912	32,390	649,883	31,986	0,311	1,247
0,4	50	553,729	32,157	551,700	31,755	0,366	1,250
0,4	0	455,552	31,930	453,524	31,530	0,445	1,253
0,5	1100	2597,489	39,294	2595,701	39,094	0,069	0,509
0,5	1050	2518,604	38,183	2516,817	37,998	0,071	0,485
0,5	1000	2420,353	37,826	2418,566	37,643	0,074	0,484
0,5	950	2322,103	37,477	2320,316	37,297	0,077	0,483
0,5	900	2223,853	37,136	2222,066	36,958	0,080	0,481
0,5	850	2125,605	36,803	2123,817	36,627	0,084	0,479
0,5	800	2027,358	36,477	2025,570	36,303	0,088	0,478
0,5	750	1929,112	36,159	1927,325	35,987	0,093	0,476
0,5	700	1830,869	35,648	1829,082	35,678	0,098	0,085
0,5	650	1732,629	35,137	1730,842	35,376	0,103	0,681
0,5	600	1634,392	34,625	1632,604	35,081	0,109	1,315
0,5	550	1536,157	34,114	1534,370	34,792	0,116	1,988
0,5	500	1437,927	33,603	1436,140	34,510	0,124	2,700
0,5	450	1339,701	34,393	1337,913	34,235	0,133	0,462
0,5	400	1241,479	34,122	1239,691	33,965	0,144	0,459
0,5	350	1143,261	33,856	1141,474	33,701	0,156	0,456
0,5	300	1045,049	33,596	1043,262	33,444	0,171	0,453
0,5	250	946,842	33,342	945,054	33,192	0,189	0,451
0,5	200	848,640	33,093	846,853	32,945	0,211	0,448
0,5	150	750,445	32,850	748,657	32,704	0,238	0,445
0,5	100	652,255	32,613	650,468	32,469	0,274	0,441
0,5	50	554,072	32,380	552,284	32,238	0,323	0,438
0,5	0	455,895	32,153	454,108	32,013	0,392	0,435
0,6	1100	2598,686	39,048	2596,397	39,289	0,088	0,617
0,6	1050	2519,801	37,939	2517,512	38,192	0,091	0,666
0,6	1000	2421,550	37,582	2419,261	37,836	0,095	0,677

Tabel C.4 (Lanjutan)

M Kg/m³	Kedalaman m	PIPESIM		Model		%Error	
		P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,6	950	2323,299	37,233	2321,010	37,489	0,099	0,688
0,6	900	2225,049	36,893	2222,760	37,150	0,103	0,699
0,6	850	2126,800	36,559	2124,511	36,819	0,108	0,710
0,6	800	2028,553	36,234	2026,264	36,495	0,113	0,721
0,6	750	1930,307	35,916	1928,018	36,179	0,119	0,732
0,6	700	1832,064	35,605	1829,775	35,869	0,125	0,743
0,6	650	1733,823	35,301	1731,534	35,567	0,132	0,754
0,6	600	1635,585	34,803	1633,296	35,271	0,140	1,345
0,6	550	1537,351	34,306	1535,062	34,983	0,149	1,972
0,6	500	1439,120	34,109	1436,831	34,700	0,159	1,733
0,6	450	1340,894	33,612	1338,605	34,424	0,171	2,417
0,6	400	1242,671	34,179	1240,382	34,154	0,184	0,074
0,6	350	1144,454	33,914	1142,165	33,890	0,200	0,069
0,6	300	1046,241	33,654	1043,952	33,632	0,219	0,065
0,6	250	948,034	33,400	945,745	33,380	0,241	0,061
0,6	200	849,832	33,152	847,543	33,133	0,269	0,056
0,6	150	751,636	32,909	749,347	32,892	0,305	0,052
0,6	100	653,447	32,671	651,158	32,656	0,350	0,047
0,6	50	555,263	32,439	552,974	32,425	0,412	0,043
0,6	0	457,087	32,211	454,798	32,199	0,501	0,038
0,7	1100	2600,13	38,76	2597,21	38,57	0,112	0,480
0,7	1050	2521,24	37,65	2518,33	37,47	0,116	0,479
0,7	1000	2422,99	37,29	2420,08	37,11	0,120	0,481
0,7	950	2324,74	36,95	2321,82	36,77	0,125	0,483
0,7	900	2226,49	36,41	2223,57	36,43	0,131	0,062
0,7	850	2128,24	35,86	2125,33	35,33	0,137	1,493
0,7	800	2029,99	35,32	2027,08	35,10	0,144	0,646
0,7	750	1931,75	34,78	1928,83	34,67	0,151	0,319
0,7	700	1833,51	34,24	1830,59	34,45	0,159	0,617
0,7	650	1735,26	33,70	1732,35	34,05	0,168	1,019
0,7	600	1637,03	33,72	1634,11	33,84	0,178	0,368
0,7	550	1538,79	33,43	1535,87	33,45	0,190	0,059
0,7	500	1440,56	33,14	1437,64	33,26	0,203	0,340
0,7	450	1342,33	32,87	1339,42	32,87	0,217	0,026

Tabel C.4 (Lanjutan)

M	Kedalaman	PIPESIM		Model		%Error	
Kg/m³	m	P out	P out	P out	P out	P out	P out
0,7	400	1244,11	32,59	1241,19	32,70	0,234	0,313
0,7	350	1145,89	33,33	1142,98	32,33	0,255	3,006
0,7	300	1047,68	33,07	1044,76	32,16	0,278	2,747
0,7	250	949,47	32,81	946,56	31,80	0,307	3,083
0,7	200	851,27	32,57	848,36	31,65	0,343	2,818
0,7	150	753,08	31,32	750,16	31,30	0,387	0,067
0,7	100	654,89	31,09	651,97	31,16	0,445	0,235
0,7	50	556,70	30,85	553,79	30,82	0,524	0,097
0,7	0	458,53	30,63	455,61	30,69	0,636	0,210
<i>Average</i>						0,187	0,825

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN D *Source Code Objective Function*

```
clear all
clc

Dimension = 5; % dimensi diganti sesuai dengan jumlah
variabel yang dioptimasi
UB = [0.5 1 0.054 1100 41]; % Upper Bounds diganti
sesuai dengan constraint fungsi objektif
LB = [0.1 0.5 0.051 1087 31]; % Lower Bounds diganti
sesuai dengan constraint fungsi objektif
save ('matlabMEOR1.mat')

clear all;
close all;
clc;

function profit=fobjbio(x)
%optimized variable
Bp=x(1);%konsentrasi Bakteri polymer (wt%)
Np=x(2);%konsentrasi Nutrisi polymer (wt%)
mp=x(3);%laju aliran massa polymer satuan (kg/s)
p=x(4);%pressure injection (psi)
T=x(5); %temperatur injeksi Biopolimer (C)

%Parameter model injection well
dwell=0.089; %diameter well (m)
g=9.8; %percepatan gravitasi (m/s2)
gc=1; %faktor gravitasi (kg m/N s2)
depth=1100; %kedalaman sumur (m)
thick=0.005; %ketebalan dinding (m)
trev=30.56; %temperatur reservoir (C)
tling= 11.56; %temperatur lingkungan (C)

%PERMODELAN MEOR
%parameter model
miub = 0.02; %reaksi bakteri dalam conservation
equation
miun = 0.02; %reaksi nutrisi dalam conservation
equation
Yb = 0.5; %laju rata-rata pertumbuhan spesifik
bakteri
Ym = 0.5; %laju rata-rata pertumbuhan spesifik
metaboit
```

```

Krwor = 0.3; %rel. permeability water at residual
oil sat
Sw = 0.5; %saturasi water
Swi = 0.16; %initial water saturasi
Sor = 0.3; %res oil saturasi
K = 100; %absoute permeability tensor
Viswt = 1; %viscosity water
Rhow = 1000 ; %density water
G = 9.81; %grafitasi
eZ = 100; %lebarreservoir
por = 0.4; %porositas
Bw = 1.002; %fakt volume
rhorock = 1.9; %density batuan

%Reaksi Bakteri, reaksi Metabolit, reaksi Nutrisi,
Permeabilitas Relatif, dan Kecepatan Darcy
Polimer
Rbp=miub*Bp*Yb;%Reaksi bakteri
Rmp=miun*Bp*Ym;%Reaksi Metabolit
Krw=Krwor*((Sw-Swi)/(1-Swi-Sor))^2;%Permeabilitas
Relatif Polimer
Uw=-(Krw*K/Viswt)*(p-(Rhow*G*eZ));%Kecepatan Darcy
Air
Up= (((visp/viswt)-(kp+(viswt/visp)))^-1)*Uw;
%Kecepatan Darcy Polimer

%Rasio saturasi air terhadap waktu, Konsentrasi
Polimer
sw=(1+((-Rbp)-Rmp)-
(Np/Bw)*Uw)/((por*Np)/Bw);%rasio saturasi air
terhadap waktu
kp=Rmp/(((por/Bw)*sw)+rhorock(1-
por)+Up/Bw);%Konsentrasi Biopolimer polymer

%INJECTION WELL
%properties Biopolimer
rhopolyi= 1079.58471849408+(2.39504821748159E-
16*kp+0.00141361946819992*p-
0.507449286683059*T); %massa jenis Biopolimer
injection well
rhowti = 1002.65277359883+(4.83264805304026E-
17*kp+0.000940642402435151*p-
0.236194990438337*T); %massa jenis air injection
well
mwti = mp*kp; %mass flowrate air injection well

```

```

qwti = mwti/rhowti; %volumetric flowrate air
      injection well
mpolyi = (1-kp)*mp; %mass flowrate Biopolimer
      injection well
qpolyi = mpolyi/rhopolyi; %volumetric flowrate
      Biopolimer injection well
lambdai = qpolyi/(qwti+qpolyi);
viscopolyi = 0.0691333739686359+(-
      2.16379252080038E-18*kp+2.59586747835452E-06*p-
      0.00165112973496316*T); %viskositas Biopolimer
      injection well
gammaairci= 0.07275*(1-0.002*(T+273-291));
      %tegangan permukaan air
mixveloci = (qpolyi+qwti)/((3.14*(dwell)^2)/4);
      %mixture velocity injection well
vliqin = qpolyi/((3.14*(dwell)^2)/4); %kecepatan
      aliran liquid injection well
liqvelonumci =
      vliqin*((rhopolyi/(g*gammaairci))^0.25); %liquid
      velocity number injection well
NFroudesci = mixveloci^2/(g*dwell); %froude number

% Mentukan Pola Aliran
L1 = exp(-4.62-3.757*(log(lambdai))-
      0.481*(log(lambdai))^2-0.0207*(log(lambdai))^3);
L2 = exp(1.061-4.602*(log(lambdai))-
      1.609*(log(lambdai))^2-
      0.179*(log(lambdai))^3+(0.635*10^-
      3)*(log(lambdai))^5);
NResci = rhopolyi*mixveloci*dwell/viscopolyi;
      %Reynold Number Biopolimer injection well
if ((NFroudesci < L1) &&( NFroudesci<L1))
      pola = 1; %1=segregated
elseif ((NFroudesci>L1) &&(NFroudesci>L2))
      pola = 2;%2=distributed
else
      pola=3; %4=intermittent
end
hlfsegci =
      ((0.98*(lambdai)^0.4846)/(NFroudesci)^0.0868)*(1
      +((1-lambdai)*(log((4.7*(liqvelonumci
      )^0.1244)/((lambdai)^-0.3692*(NFroudesci)^-
      0.5056))))*(sin(1.8*-90)-((1/3)*(sin(1.8*-
      90))^3))); %Holdup fraction segregated injection
      well

```

```

hlfdistci =
    ((1.065*(lambdai)^0.5824)/(NFroudesci)^0.0609)*
    (1+((1-
    lambdai)*(log((4.7*(liqvelonumci)^0.1244)/((lamb
    dai)^-0.3692*(NFroudesci)^-0.5056))))*(sin(1.8*-
    90)-((1/3)*(sin(1.8*-90))^3))); %Holdup fraction
    distributed injection well
hlfintci =
    ((0.84*(lambdai)^0.5351)/(NFroudesci)^0.0173)*(1
    +((1-
    lambdai)*(log((4.7*(liqvelonumci)^0.1244)/((lamb
    dai)^-0.3692*(NFroudesci)^-0.5056))))*(sin(1.8*-
    90)-((1/3)*(sin(1.8*-90))^3))); %holdup fraction
    intermittent

if pola == 1
    HLICI = hlfsegci;
elseif pola == 2
    HLICI = hlfdistci;
elseif pola == 3
    HLICI = hlfintci;
end

%y injection well Biopolimer
yci = lambdai/(HLICI^2);

%s injection well Biopolimer
sci = log(yci)/(-0.0523+(3.182*log(yci))-
    (0.8725*(log(yci))^2)+(0.01853*(log(yci))^4));
ffpolyi = exp(sci); %faktor gesekan Biopolimer
    injection well
pdfpolyi=
    ((ffpolyi*rhopolyi*(mixveloci^2))*depth/(gc*dwel
    l)); %pressure drop friction Biopolimer
    injection well (Pa)
pdepolyi= ((rhopolyi*g*depth)/gc); %pressure drop
    elevationBiopolimerinjection well (Pa)
pdtpolyi=(pdfpolyi+pdepolyi)*0.000145038;%total
    pressure drop injection

%well psi 0.000145038=convert (Pa) to (psi)

%heat transfer Biopolimer injection well
Kpolyi=0.0889682119395101+(0.00431790356076911*kp-
    0.0000622095293451638*T+3.1338988069358E-08*p);

```



```

%Konduktivitas Thermal Biopolimer injection well
(W/mK)
CPpolyi= 0.983714007870475+(-1.69658160833949E-
06*p+3.42526278326974E-19*kp-
0.000362625469928491*T);%Heat capacity
Biopolimer injection well (kJ/kgK)
NPpolyi=CPpolyi*viscopolyi/Kpolyi;%Prandlt Number
Biopolimer injection well
NNupolyi=0.023*(NResci^0.8)*(NPpolyi^0.3);%Nuselt
Number Biopolimer injection well
hpolyi=NNupolyi*Kpolyi/dwell;%heat transfer
coefficient Biopolimer injection well (W/m2K)
Rpolyi=thick/(Kpolyi*(3.14 *dwell));%Resistansi
konduktivitas thermal Biopolimer injection well
(K/W) 0.005-wallthicknes
Upolyi=hpolyi+(1/(Rpolyi*depth));%All Heat
transfer coefficient Biopolimer injection well
(W/m2K)
Qpolyi=mp*CPpolyi*(T-trev);%energy panas
Biopolimer injection well (watt)
dTpolyi=(Qpolyi/(Upolyi*3.14*dwell*depth)); %Delta
T Biopolimer injection well (C)

%RESERVOIR
%Biopolimer
tpolyr = T-dTpolyi; %temperature Biopolimer pada
reservoir (C)
ppolyr=p-pdtpolyi; %pressure Biopolimer pada
Reservoir (psi)

%parameter model
tres=30.56; %temperature reservoir (C)
resthick=10.4; %reservoir thickness (m)
reslength=100; %reservoir length (m)
Krock=5.678263; %thermal conductivity (W/mK)
permeabil= 1.78629E-14; %permeability (m2)
poros= 0.07; %porosity batuan

%properties Biopolimer
rhopolyr = 1064.07706829299+(1.49467458549801E-
12*tpolyr)+(0.00141361946820053*ppolyr); %massa
jenis Biopolimer reservoir
viscopolyr = 0.00229106069770524+(-
3.13006969523032E-19*tpolyr-5.19477900167832E-
08*ppolyr); %viscositas Biopolimer reservoir

```

```

qpolyr = mp/(rhopolyr*poros); %volumetric flowrate
  Biopolimer reservoir
vpolyr = qpolyr/(3.14*(resthick^2)/4); %kecepatan
  aliran Biopolimer reservoir
NRepolyr = (rhopolyr*vpolyr*resthick)/viscopolyr;
  %Reynold Number Biopolimer reservoir
pdpolyr
  =((viscopolyr*qpolyr*reslength)/(permeabil*(3.14
  *resthick^2/4)*reslength)*0.000145038);%pressure
  drop Biopolimer reservoir psi. thicknes 35.052m

%heat transfer Biopolimer
CPpolyr = 0.983714007870474+(-
  0.00036262546992844*tpolyr-1.69658160833975E-
  06*ppolyr); %CP Biopolimer pada reservoir
Kpolyr = 0.0911271637198951+(-
  0.0000622095293451793*tpolyr+3.13389880693682E-
  08*ppolyr); %konduktivitas thermal Biopolimer
  pada reservoir
Prpolyr = CPpolyr*viscopolyr/Kpolyr; %Prandlt
  Number Biopolimer pada reservoir
Nupolyr = (0.023*(NRepolyr^0.8)*Prpolyr^(0.3));
  %Nusselt Number Biopolimer pada reservoir
Lppolyr =
  (3.14*0.25*(resthick^2)*reslength)^(1/3);
  %Length characteristic Biopolimer pada reservoir
hpolyr = (Nupolyr*Krock)/Lppolyr; %heat transfer
  coefficient Biopolimer pada reservoir
Rkvpolyr = 1/(hpolyr*3.14*(resthick^2)*0.25);
  %tahanan konveksi perpindahan panas Biopolimer
  di reservoir
Rkdpolyr = Lppolyr/(Krock*3.14*0.25*(resthick^2));
  %tahanan konduksi perpindahan panas Biopolimer
  di reservoir
qpolyr = (tpolyr-
  tres)/((Rkvpolyr+Rkdpolyr)*reslength); %energy
  panas Biopolimer+oil+Biopolimer yg terbuang di
  reservoir (J)
dTpolyr = qpolyr/(mp*CPpolyr); %delta temperatur
  Biopolimer pada reservoir

%PRODUCTION WELL
  %Biopolimer
  tpolyp = tpolyr-dTpolyr; %temperatur Biopolimer
  production well (C)

```

```

ppolyp = ppolyr-pdpolyr; %tekanan Biopolimer
production well (psi)

%Properties Biopolimer
rhopolyp = 1083.53306164608+(-
0.603253224805079*tpolyp)+(0.00111561020644659*p
polyp); %massa jenis Biopolimer pada production
well
rhowtp = 1002.65277359883+(4.83264805304026E-
17*kp+0.000940642402435151*ppolyp-
0.236194990438337*tpolyp); %massa jenis air pada
production well
mwtp = mp*kp; %laju aliran massa air pada
production well
qwtp = mwtp/rhowtp; %volumetric flowrate air pada
production well
mpolyp = (1-kp)*mp; %laju aliran massa Biopolimer
pada production well
qpolyp = mpolyp/rhopolyp; %volumetric flowrate
Biopolimer pada production well
lambdacp = qpolyp/(qwtp+qpolyp);
viscopolyp = 0.0338551902600416+(-
0.000661445352676757*tpolyp+0.000001346032406510
6*ppolyp); %viscositas Biopolimer pada
production well
gammaaircp = 0.07275*(1-0.002*((tpolyp+273)-291));
%tegangan permukaan air pada production well
mixvelopolyp =
(qwtp+qpolyp)/((3.14*(dwell)^2)*0.25);
%kecepatan campuran
Biopolimer+minyak+Biopolimer+air pada production
well
vpolyp = qpolyp/((3.14*(dwell)^2)*0.25);
%kecepatan Biopolimer+minyak+Biopolimer pada
production well
liqvelonump =
vpolyp*((rhopolyp/(g*gammaaircp))^0.25); %Liquid
velocity number Biopolimer pada production well
NFrpolyp = mixvelopolyp/(g*dwell); %Froude Number
Biopolimer pada production well

L1 = exp(-4.62-3.757*(log(lambdacp))-
0.481*(log(lambdacp))^2-
0.0207*(log(lambdacp))^3);

```

```

L2 = exp(1.061-4.602*(log(lambdacp))-
1.609*(log(lambdacp))^2-
0.179*(log(lambdacp))^3+(0.635*10^-
3)*(log(lambdacp))^5);
if (NFrpoly<L1)
    pola = 1; %segregated
elseif (NFrpoly>L1 && NFrpoly>L2)
    pola = 2; %Distributed
else pola = 3; %Intermittent
end
hlfsscp =
((0.06*(lambdacp)^0.4846)/(NFrpoly)^0.0868)*(1+
((1-
lambdacp)*(log((4.7*(liqvelonump)^0.1244)/((lamb
dacp)^-0.3692*(NFrpoly)^-0.5056))))*(sin(1.8*-
90)-((1/3)*(sin(1.8*-90))^3))); %Hold up
fraction segregated Biopolymer production well
hlfdsdp =
((1.065*(lambdacp)^0.5824)/(NFrpoly)^0.0609)*(1
+((1-
lambdacp)*(log((4.7*(liqvelonump)^0.1244)/((lamb
dacp)^-0.3692*(NFrpoly)^-0.5056))))*(sin(1.8*-
90)-((1/3)*(sin(1.8*-90))^3))); %Hold up
fraction distributed Biopolymer production well
hlfisdp =
((0.84*(lambdacp)^0.5351)/(NFrpoly)^0.0173)*(1+
((1-
lambdacp)*(log((4.7*(liqvelonump)^0.1244)/((lamb
dacp)^-0.3692*(NFrpoly)^-0.5056))))*(sin(1.8*-
90)-((1/3)*(sin(1.8*-90))^3))); %hold up
fractoin intermittent Biopolymer production well

if pola == 1
    HLCP = hlfsscp;
elseif pola == 2
    HLCP = hlfdsdp;
else HLCP = hlfisdp;
end

%y iproduction well Biopolymer
ycp = lambdacp/(HLCP^2);
%s production well Biopolymer
scp = log(ycp)/(-0.0523+(3.182*log(ycp))-
(0.8725*(log(ycp))^2)+(0.01853*(log(ycp))^4));

```

```

ffpolyp = exp(scp); %faktor gesekan Biopolimer
production well
NRepolyp =
(rhopolyp*mixvelopolyp*dwell)/gammaaircp;
%Reynold Number Biopolimer production well
pdfpolyp =
((ffpolyp*rhopolyp*(mixvelopolyp^2))*depth/(gc*d
well)); %pressure drop friction Biopolimer
injection well (Pa)
pdpolyp= ((rhopolyp*g*depth)/gc); %pressure drop
elevation surfactan injection well (Pa)
pdtolyp=(pdfpolyp+pdpolyp)*0.000145038;%total
pressure drop injection well psi
0.000145038=convert (Pa) to (psi)

%heat transfer
CPpolyp = 0.864368302826418+(-1.81126450885868E-
06*ppolyp+0.000303416785303688*tpolyp); %heat
transfer coefficient pada tekanan konstan
Biopolimer pada production well
Kpolyp =
0.011077821193951+(0.00431790356076911*kp-
0.0000622095293451638*tpolyp+3.1338988069358E-
08*ppolyp); %konduktivitas thermal Biopolimer
pada production well
NPrpolyp = (CPpolyp*viscopolyp)/Kpolyp; %prandtl
number Biopolimer pada production well
NNupolyp = 0.023*(NRepolyp)^0.8*(NPrpolyp)^0.3;
%Nusselt number Biopolimer pada production well
hpolyp = NNupolyp*Kpolyp/dwell; %heat koefisien
Biopolimer pd production well
Rpolyp = thick/(Kpolyp*3.14*dwell); %tahanan panas
Biopolimer pada production well
qpolyp = (mp*CPpolyp*(tpolyp-tling)); %panas
Biopolimer yang hilang pada production well
Upolyp = hpolyp+(1/Rpolyp); %all heat transfer
coefficient Biopolimer pada production well
dtpolyp = qpolyp/(Upolyp*3.14*dwell*depth); %delta
T Biopolimer pada production well
tpolyt = tpolyp-dtpolyp; %temperature Biopolimer
pada outlet

%OIL RECOVERY
oilprice = 61.30; %harga minyak/bbl

```

```

voip=reslength*3.14*0.25*(resthick^2)*poros;%vol
ume original oil in place=volume
reservoir*porosity m3

%Biopolimer
%parameter model
voipp=177000; %volume oil in place (stb)
corp =112000; %total Biopolimer oil recovery (stb)
Sorw = 0.3; %Saturasi residual minyak oleh air
Sor = 0.08; %Saturasi residual minyak
Boi = 1; %volume faktor minyak kondisi awal
API = 41; %API degrees minyak
Soi = 0.4; %Saturasi minyak awal

alpha = 0.000288+(8.04111*10^-6*API)-(1.89*10^-
7*(API^2));
Bo = 1+(alpha*((9/5)*tpolyp+32)-60)); %volume
faktor minyak
Evm = ((corp/voipp)+(Boi/Bo)-1)/((Boi/Bo)*(1-
(Sorw/Soi))); %Volumetric sweep efficiency
Npc = voipp*Evm*(Sorw-Sor)/Bo; %Cumulative oil
recovery (stb)
minjp = mp*3600*24; %massa injeksi Biopolimer per
hari (kg/d)
volinjpoly = minjp/(rhopolyi); %volume injeksi
Biopolimer per hari (m3/day)
timeinjp= voip/volinjpoly ;%waktu injeksi (day)
ordp = Npc/timeinjp ;%oil recovery per day
Biopolimer
pttotal =ordp*oilprice; %pendapatan dalam satuan
USD/d

%biaya pembelian Biopolimer per day
%parameter model
Nprice = 0.041328; %USD/kg;
Bprice = 0.494921; %USD/kg;
bnutrisi=(Nprice*qpolyi*Np*3600*24); %biaya
nutrisi per hari operasi; USD/d
bbakteri=(Bprice*qpolyi*Bp*3600*24); %biaya
nutrisi per hari operasi; USD/d
biapoly = bnutrisi + bbakteri; %biaya Biopolimer
per hari operasi; USD/d

%biaya operasional pompa injeksi per day

```

```
K = 0.1049; %tarif dasar listrik industri di
Ohio,USA
Y = 24*3600; % lama operasi pompa (s)
WP=(qwti*(pdtpolyi+pdpolyr+pdtpolyp))/(1000*0.8);
%kinerja pompa Biopolimer perjam
bpump= WP*Y*K; %USD/day 0.1049 harga listrik
CA,USA
profit=(pttotal-biapoly-bpump);
end
```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Lamongan pada tanggal 30 Maret 1996 dengan diberi nama Eka Wahyu Prasajo. Bapak bernama Thukul Prasajo, Ibu bernama Yateni, dan adik perempuan bernama Imelda Saharatu Mahardini. Penulis telah menyelesaikan studi di SDN Kembangbahu II pada tahun 2008, SMP Negeri Kembangbahu pada tahun 2011, SMA Negeri 11 Surabaya pada tahun 2014, D3 Teknik Instrumentasi Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) pada tahun 2014 dan kemudian pada tahun 2017 melanjutkan kuliah jenjang S1 melalui program lintas jalur pada Departemen Teknik Fisika, Program Studi S1 Teknik Fisika. Penulis pernah melakukan kerja praktek di PT. Geo Dipa Energi, Dieng Wonosobo pada tahun 2016 dan di PT. Perusahaan Gas Negara Region 2, Surabaya pada Tahun 2018. Bidang minat yang ditekuni yaitu riset teknologi, karya tulis ilmiah dan kompetisi kewirausahaan. Adapun beberapa prestasi yang pernah diraih oleh penulis dalam bidang karya tulis ilmiah dan kewirausahaan diantaranya penulis pernah menjadi juara Favorit di *Hi-Great National Paper Competition* 2015 di Universitas Brawijaya, Juara 1 Esai Nasional *Festival Agri-Science Technology* 2016 di Universitas Sebelas Maret, Juara 1 Esai Nasional *Biology Science Writing Competition* 2017 di Universitas Muhammadiyah Malang, Juara 1 *Student Paper Competition* PETROFORIA 2017 di STT Migas Balikpapan, Juara Harapan 1 Lomba Karya Tulis Ilmiah Mahasiswa di Universitas Brawijaya, Juara 2 *Green Online National Essay Competition* di Universitas Islam Negeri Riau, Finalis Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional (PIMNAS) 31 Tahun 2017 di Universitas Muslim Indonesia Makassar dan Finalis Kewirausahaan Mahasiswa Indonesia (KMI) *Award* Tahun 2018 di Institut Pertanian Bogor. Selain itu penulis

juga aktif dalam beberapa keorganisasian diantaranya pada tahun pertama penulis menjadi anggota UKM Pencak Silat PSHT komisariat ITS, pada tahun kedua penulis menjadi staff Departemen Komunikasi dan Informasi Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika ITS, pada tahun ketiga penulis menjadi Asisten Laboratorium Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol divisi *Human Resources and Development*, dan pada tahun keempat hingga sekarang penulis tergabung pada tim Alumni Pimnas (ALNAS) sebagai pengawal PKM ITS. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui nomor telepon 087753400003 atau email twahyu320@gmail.com.